INRS CDU 658.564

Robots et ensembles automatisés

Impact de leur utilisation sur les conditions de travail au sein de la Communauté européenne

La Direction Santé et Sécurité (DG5) de la Commission des Communautés Européennes a confié à l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), une étude intitulée « Utilisation des robots et ensembles automatisés et leur impact sur les conditions de travail au sein de la Communauté Européenne » (1)

J.P. Vautrin, service Electronique-Sécurité des systèmes, centre de recherche de l'INRS, Nancy,
en collaboration avec
R. Edwards, inspecteur principal du Health and safety executive (HSE), Birmingham,
et P. Nicolaisen, consultant en sécurité robotique, Stuttgart

Cette note, issue d'une étude confiée à l'INRS par la Communauté européenne, est constituée de quatre parties :
– glossaire des termes relatifs à l'automatisation en général ; analyse des facteurs indiquant le niveau d'automatisation et le degré d'interférence avec l'opérateur ou l'intervenant ; différents domaines de l'automatisation (depuis le manipulateur asservi à des mouvements répétitifs jusqu'aux ateliers flexibles totaux et aux systèmes d'automatisation intégrée de production) ;
– état des lieux en Europe : robots manipulateurs industriels, ateliers flexibles, automates programmables, robots mobiles et chariots sans conducteur ; robotique et nouvelles technologies ; possibilité d'entrée dans la robotique dans des secteurs tels que l'agriculture, le bâtiment, les services publics ; exemples d'application pour les robots mobiles, en robotique avancée (médecine, chirurgie, nucléaire...) ; impact de l'automatisation sur l'hygiène et la sécurité ;
– comptes rendus d'enquêtes d'accidentologie menées au Japon, en Suède, en France, en Grande-Bretagne et en Allemagne, suivis par quelques exemples dont l'analyse permet de préciser les causes les plus fréquentes (intervention sur site, défaillance de conception du système, normes mal appliquées) ;
– rencensement des divers documents réglementaires, normatifs et informatifs sur la sécurité en automatisation ; exemples de protection.
L'accident lié à l'automatisation n'est pas une fatalité mais peut être évité si à tous les niveaux de la vie du système : conception, construction mais aussi utilisation, l'aspect sécurité est pris en compte sérieusement au même titre que les autres grandeurs (disponibilité, cadences de production...).

Robotique / Automatisation / Système homme-machine / Accident du travail / Incident / Mesure de prévention / Industrie / Communauté européenne

Use of robots and automated systems and their impact on working conditions in the European Community

This paper is the result of a study commissioned by the European Community, and comprises four parts :
– glossary of general automation terminology ; analysis of the factors indicating the level of automation and the degree of interference with the operator or maintenance and repair staff ; different fields of automation (from the manipulator designed for repetitive movements to full-scale flexible workshops and integrated manufacturing systems) ;
– report on the current situation in Europe : manipulating industrial robots, flexible manufacturing systems, programmable controllers, mobile robots and driverless vehicles ; robotics and new technologies ; possibility of using robot technology in sectors such as agriculture, construction, public services ; examples of application for mobile robots and advanced robot technology (medicine, surgery, nuclear industry, etc.) ; impact of automation on health and safety ;
– summaries of accident surveys conducted in Japan, Sweden, France, the United Kingdom and Germany, followed by some examples showing the most frequent causes of accidents (on-site intervention, defect in system design, failure to comply with standards) ;
– review of the different regulations, standards and guidelines on safety in automation ; examples of protective measures.
Automation need not lead to accidents. Accidents can be avoided if, at all stages in the life of the system (design, construction and use), the safety aspect is considered as seriously as other factors (availability, production rates, etc.).

Robotics / Automation / Man-machine system / Occupational accident / Prevention / Industry / European community

1. GENERALITES

1.1. Indicateurs du niveau d'automatisation

Afin de bien caractériser l'automatisation, 6 indicateurs sont proposés, dont quatre sont empruntés aux travaux du groupe de travail réuni en 1988 par le ministère du Travail français.

L'interaction

L'interaction entre deux éléments peut présenter différentes modalités :

– relation classique de cause à effet ;

– relation temporelle dans laquelle un événement A est suivi avec un certain décalage d'un événement B ;

– relation dite de rétroaction ou de feed-back ;

(1) Ce document fait l'objet d'une publication concertée en anglais et en allemand.

ENCADRÉ N° 1

Définitions

Il est impératif de circonscrire au mieux les domaines d'investigation souhaités par la Communauté Européenne dans le cadre de la convention CE-INRS.

Pour aboutir à cette clarification, il est nécessaire de définir un certain nombre de termes spécifiques à l'automatisation qui font l'usine d'aujourd'hui et encore plus celle de demain.

Atelier flexible total (*full scale flexible manufacturing system*) : Système dans lequel le contrôle de production, la planification et le système de fabrication automatique sont interconnectés afin de donner rapidement des consignes à la fabrication. En d'autres termes, les demandes de modifications de programme, les chargements de spécifications, les différents ordres des séquences de montage peuvent être obtenus rapidement par interconnexion des systèmes d'informations.

Un tel système donne à un fabricant la possibilité de répondre à ses besoins de diversification des produits, de délai court et lui permet d'accepter de nombreuses modifications même très fréquentes.

Automate programmable industriel (*industrial programmable controller*) : Composant électronique à base de microprocesseur(s) qui comporte une mémoire programmable par un utilisateur non-informaticien à l'aide d'un langage adapté. Cette mémoire permet le stockage des instructions composant les fonctions d'automatisme. Un automate programmable a pour fonction de commander, mesurer et contrôler, au moyen des modules d'entrées et de sorties, différentes sortes de machines ou de processus en environnement industriel.

Automatisation : C'est le procédé qui permet d'exécuter une activité, un processus ou une fonction de machine sans intervention humaine. Toutefois, l'automatisation peut coagir avec l'homme, qui peut soit entrer des informations, soit effectuer certaines tâches (dans le cas de systèmes dits semi-automatiques).

Automatisation intégrée du système de production (*computer-integrated manufacturing*) : Approche globale de l'automatisation de l'usine prenant en compte tous les aspects de fabrication mais aussi de gestion.

Cellule robotisée : Comme il n'y a pas de définition convaincante, nous nous en tiendrons à sa composition. La cellule robotisée comprend :
– le robot (équipement et logiciel) ; c'est-à-dire le manipulateur, mobile ou non, l'équipement de puissance et le système de commande ;
– le terminal ou les terminaux ;
– tous les équipements, dispositifs ou capteurs nécessaires pour que le robot accomplisse sa tâche ;
– toute interface de communication qui met en œuvre et contrôle le robot, pour autant que ces dispositifs périphériques soient supervisés par le système de commande du robot.

Chariots et véhicules autoguidés (*automatically guided vehicles*) : Ce type de véhicule motorisé est capable de se déplacer automatiquement à l'aide de systèmes de guidage non mécaniques.

Electronique programmable ou programmée (*programmable electronic*) : Appellation des systèmes électroniques basés sur un processeur et capables d'effectuer des calculs au sens large. Les composants en sont : les entrées ; la mémoire ; le(s) processeurs ; les sorties ; le logiciel.

Intelligence artificielle (*artificial intelligence*) : Domaine de l'informatique dont le but est de comprendre l'intelligence humaine en la modélisant à l'aide d'un ordinateur, afin de construire un système qui agisse de façon intelligente soit seul, soit en association avec l'homme.

Robot manipulateur industriel (*industrial manipulator robot*) : Manipulateur à plusieurs degrés de liberté, à commande automatique, reprogrammable, multi-opérations, mobile ou non, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle.

Réseaux locaux (*local area networks*) : Moyens de communication entre divers systèmes (machines-ordinateurs-terminaux).

Robot mobile (*mobile robot*) : Le robot est monté sur une base mobile, commandée automatiquement, qui est en fait un chariot ou un véhicule autoguidé.

Système automatisé de production : Il n'existe pas de définition reconnue d'un système automatisé. Toutefois dans les travaux normatifs de l'ISO TC 184 WG4, un système automatisé est défini par sa composition. « Une configuration minimale d'un système automatisé » est composée de :
– 2 ou plusieurs machines industrielles incluant un système de manutention de matériau ;
– de système(s) électronique(s) programmable(s) ou au minimum de moyens d'action de coordination entre machines.

Système expert (*expert system*) : Système basé sur des règles ou des connaissances utilisant un programme dans lequel entrent des règles de conception et d'où l'on ressort un guide ou une solution pour résoudre un problème (d'ingénierie par exemple).

Télémanipulateur (*telemanipulator*) : Manipulateur conçu pour effectuer un travail dans un milieu différent et/ou éloigné de celui où se trouve l'opérateur qui le commande en temps réel, éventuellement avec l'assistance d'un automatisme.

XAO = X assisté par ordinateur (*computer-assisted X*) : Techniques permettant d'aider à la réalisation de fonctions diverses X à l'aide d'ordinateur(s) : CAO (conception assistée par ordinateur), FAO (fabrication...), QAO (qualité...), GPAO (gestion de production...), IAO (ingénierie...), PAO (planification...).

– interaction indirecte : une action partie de A passe par B, C... avant de revenir sur A.

La totalité

Un système est composé d'éléments ou sous-systèmes. Cela ne signifie pas qu'il est seulement la somme de ses éléments. Le système est un ***tout*** non réductible à ses parties. Le ***tout*** implique l'apparition de qualités émergentes que ne possédaient pas les parties.

L'organisation

C'est le concept central de la systémique. C'est l'agencement de relations entre composants qui produit une nouvelle unité possédant des qualités que n'ont pas ses composants. L'organisation revêt deux aspects qu'il faut analyser séparément : l'aspect structurel et l'aspect fonctionnel. La structure renseigne sur la hiérarchie sous forme d'organigramme. La fonction décrit le programme. Les deux aspects sont complémentaires.

La complexité

La logique cartésienne tend vers la simplification des phénomènes en éliminant l'incertain, l'inconnu ou l'aléatoire. Dans un système, la complexité est partout. Il est nécessaire de la conserver, quitte à admettre qu'on ne puisse en saisir et comprendre toute la richesse. Le degré de complexité dépend à la fois du nombre de ses éléments et du nombre et des types de relations.

Le niveau d'automatisation

Les quatre concepts précédents permettent de décrire un système automatisé. On comprend aisément que selon le degré d'interaction, d'organisation et de complexité, le système puisse être aux deux extrêmes soit un automatisme simple (appelé aussi automatisme rigide ou fixe accomplissant la seule fonction pour laquelle il a été conçu et réalisé) soit un atelier flexible total, soit même un système de production avec automatisation intégrée.

Le niveau de l'intervention humaine

Toutefois, cette analyse proposée par A. Meyer ne concerne apparemment que le système technologique. Afin de rendre compte au mieux de la réalité du système homme-automatisation, il faut considérer, sur le plan de l'***interaction*** et de l'***organisation,*** l'influence de l'homme, opérateur ou personnel d'intervention. Cette présence humaine « enrichit » également la ***complexité*** et doit être comprise comme incluse dans la ***totalité.***

En fait, l'intervention humaine doit être prise en compte autant pour l'aspect structurel que pour le fonctionnel. Elle peut être nécessaire, soit comme partie du cycle de production (poste de travail manuel sur une ligne de soudage robotisée par exemple), soit pour effectuer à intervalles réguliers un entretien du système (changement d'électrodes par exemple), soit de façon intermittente en réponse à des dysfonctionnements du système ou de l'usine mais aussi pour modifier les paramètres du système ou de l'usine.

1.2. Champ couvert par l'étude

Deux dichotomies peuvent être effectuées, l'une selon le type de milieu d'applicatif (fig. 1), l'autre selon le type d'actions de l'électronique programmable (fig. 2).

Il est entendu qu'il ne rentre pas dans le champ de cette convention de prendre en considération l'électronique programmable. L'objectif est d'analyser l'application en milieu industriel de type production manufacturière et de type bâtiment-travaux publics (fig. 1). On exclut, volontairement, l'automatisation de type contrôle de processus dans l'industrie chimique et nucléaire.

Toutefois, afin d'éclairer au mieux la Communauté européenne, des informations concernant les perspectives

Milieu industriel	Milieu non industriel
a) • Site fixé (dans le sens de site établi, usine, atelier)	d)• Domestique
b) • Site ouvert, changeant (construction, bâtiment, travaux publics)	e)• Non domestique, services divers (hôpitaux, transports, agriculture, travaux sous-marins)
c) • Autres (nucléaire, laboratoire de chimie, de biologie)	

Fig. 1. Dichotomie « industriel – non industriel » ▲

Electronique programmable	
↓	↓
Action mécanique	Contrôle de processus
Domaines principaux	
Productique (production manufacturière)	Chimie Nucléaire Métallurgie
Actions	
Commande de relais, de moteurs... de façon générale, déplacement d'organes assurant les fonctions ci-dessous	Contrôles et régulation de grandeurs mécaniques, électriques, chimiques (distance, vitesse, accélération, pression, débit, température...)
Fonctions assurées	
Transport Manipulation	Asservissement d'une grandeur Limitation de cette même grandeur

Fig. 2. Dichotomie « action mécanique – contrôle de processus » ►

de nouveaux robots dans les secteurs nucléaires, hospitaliers et agricoles seront apportées, car ils auront naturellement un impact sur les conditions du travail du personnel concerné, même s'il ne s'agit pas de machinerie au sens strict du terme. Cette démarche est légitimée par le titre de la Directive qui a trait aux équipements de travail en général.

En ce qui concerne le terme « conditions de travail », il a été interprété comme général comprenant : l'hygiène au poste de travail ; la prévention des accidents du travail ; l'ergonomie.

L'automatisation a des effets contradictoires. On observe des aspects principalement positifs comme : l'éloignement du personnel des zones et des produits dangereux ; la diminution de la fatigue musculaire ; la dissociation entre le travail de l'homme et les cycles machine. Mais, il subsiste des aspects négatifs, si l'on n'y prend garde : les nouveaux risques lors des interventions nécessaires ; l'accroissement des accidents lors de la coactivité homme-automatisation.

L'objet de cette étude sera de montrer l'impact actuel et prévisible de l'automatisation sur les conditions de l'homme au travail.

Il faut, dès à présent, insister sur les problèmes de qualification, de formation et de bien-être au travail qui de toute évidence, ont et auront une influence correctrice sur les accidents.

1.3. Développements sur les systèmes et les éléments

Guy Benchimol représente le ***concept usine*** par l'interaction de quatre systèmes.

Le ***système physique*** production-manutention-stockage inclut les automatismes et l'informatique industrielle nécessaires à son fonctionnement de même que les équipements pour la maintenance et la sécurité, le sous-système énergétique, le sous-système bâtiments.

Le ***système humain*** englobe la totalité de l'effectif humain – permanent ou temporaire – qui intervient sur le site de l'usine.

Le ***système nerveux*** est l'ensemble de l'organisation de l'information et des circuits de décision de l'usine ; c'est le « software » de l'usine (les équipements correspondants sont inclus dans le système physique).

Le ***système flux de produits*** est le flux physique de tous les composants entrant dans l'usine, qu'il s'agisse de matières premières, d'articles de conditionnement, de semi-finis, de pièces de rechange de fournitures pour les ordinateurs...

La différence essentielle entre l'usine de demain et celle d'aujourd'hui porte sur trois aspects :

– augmentation de l'interface entre les 4 sous-systèmes,

– flexibilité des flux de matière et de produits afin de répondre à un marché mouvant,

– informatique passant d'une fonction de constat à celle d'aide à la décision.

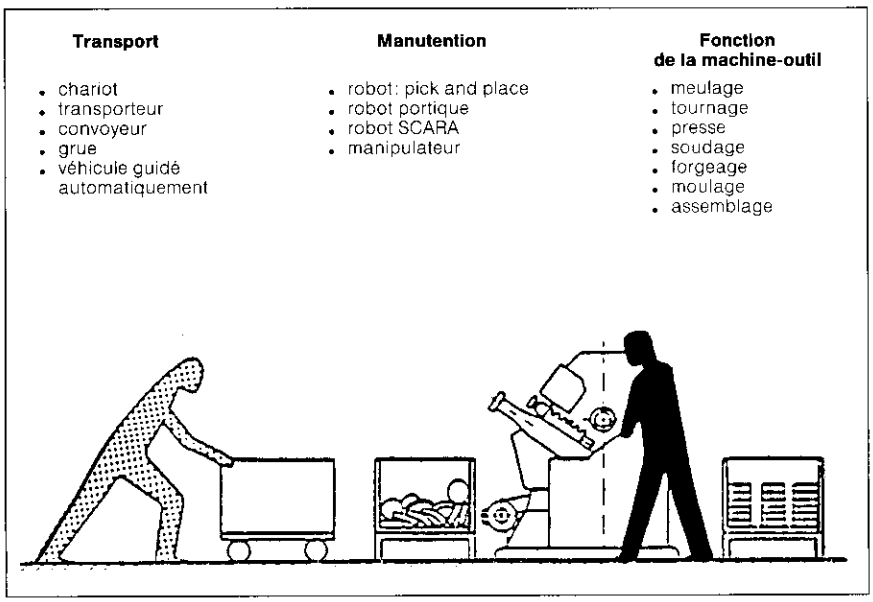

Fig. 3. Illustration de la coactivité homme-machine

1.3.1. Les robots comme moyens de manutention

Les robots peuvent servir à mouvoir les pièces, les outils de production ou les deux à la fois.

Manutention de pièces

On retrouve de façon générale, les fonctions transport et travail sur la pièce associées à la fonction manutention.

La figure 3 illustre la fabrication traditionnelle où l'homme intervient pour les fonctions de transport et de manutention, la machine assurant la fabrication.

L'automation d'un tel processus consiste à rendre automatique le transport de pièces et de matériaux par l'utilisation de chariots sans conducteur, de convoyeurs... et à automatiser la manutention par un robot manipulateur par exemple.

Dans cette optique, 3 types de relations peuvent être mis en œuvre :

- type A = dissociation des 3 fonctions ;
- type B = association transport–manutention (ex.: robot mobile manipulateur) ;
- type C = association manutention–machine outil (ex.: robot manipulateur).

Manutention d'outil

Le robot se substitue totalement ou partiellement aux autres machines. On distinque quatre types de manutention d'outils: fabrication manuelle, robot avec outil, machine outil universelle ou machine outil spécifique.

Manutention d'outil et de pièce

Il s'agit soit de robot avec terminal multifonction, soit de systèmes avec possibilité de remplacement outil-préhenseur.

1.3.2. Systèmes de fabrication et sous-systèmes

Les sous-systèmes du *robot seul* peuvent être les suivants: cinématique/commande/système de mesure/terminal. Dans le cas d'un *système robotique*, les sous-systèmes associés au soudage à l'arc par exemple sont illustrés figure 4. On notera que la commande centrale agit sur le robot mais aussi sur la table tournante, l'appareillage de soudage, les dispositifs de sécurité...

La figure 5 illustre divers degrés d'automatisation dans le cas d'un processus de perçage et meulage. Selon le degré d'automatisation, la fabrication passe d'un système à commande manuelle à celui d'un atelier flexible où toutes les fonctions sont automatisées.

1.3.3. Automatisation intégrée du système de fabrication – Problème des interconnexions

L'une des tendances possibles de l'usine de demain est l'évolution vers une approche globale de l'automatisation dans l'usine prenant en charge tous les aspects de fabrication du produit mais aussi de la gestion avec l'ensemble des interconnexions.

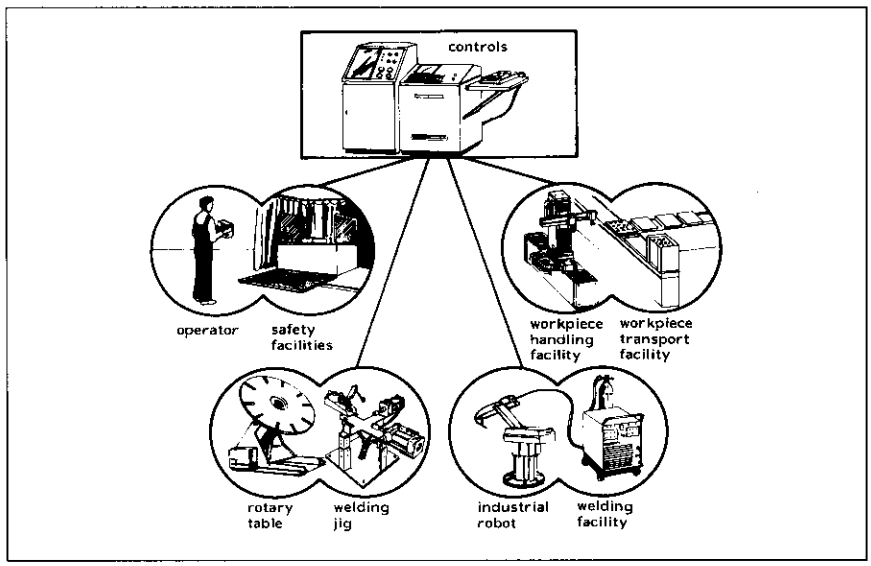

Fig. 4. Système robotique et sous-système pour le soudage à l'arc (doc. IFF-IPA, déc. 90)

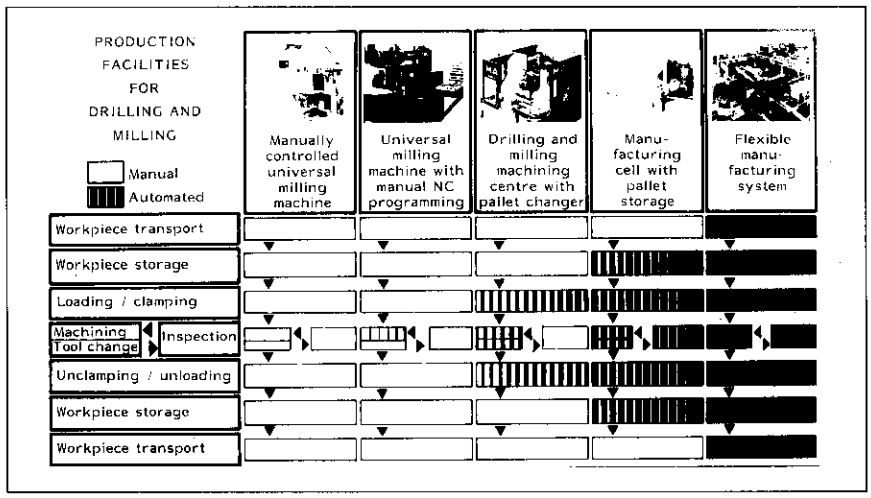

Fig. 5. Degré d'automatisation d'un processus de perçage-meulage (doc IFF-IPA, déc. 90)

Cette automatisation intégrée met en œuvre la CAO, la PAO, la QAO..., c'est-à-dire toutes les fonctions de conception, de planification, de fabrication, de qualité... gérées par ordinateur.

Le système peut être analysé en coupe verticale qui montre les interconnexions entre fonctions, ou bien, au niveau le plus proche de la production, par une coupe horizontale, qui met en évidence des sous-systèmes fonctionnels tels que stockage, transport, manutention...

TABLEAU I

Evolution comparative des parcs robotiques en Europe, au Japon et aux Etats-Unis

Années	Japon	USA	Europe
1983	**30 000**	**8 000**	**13 700**
1984	44 000	13 000	20 500
1985	65 000	20 000	30 000
1986	87 000	26 000	40 000
1987	106 000	30 000	46 000
1988	152 000	35 000	53 000
1989	220 000	37 000	67 000
1990	**240 000**	**45 000**	**80 000**

2. EVOLUTION TECHNIQUE

2.1. Evaluation du parc actuel des robots et ensembles automatisés

Deux facteurs influencent l'évaluation du parc réel des robots et ensembles automatisés:

– la prise en compte variable selon les sources et les pays de ce qu'est réellement un robot, malgré une définition internationale précise et acceptée par tous. Les japonais, par exemple, ont parfois tendance à inclure des manipulateurs simples dans leurs statistiques;

– les sources d'information contestables: que ce soit par les associations nationales de robotique ou par les constructeurs, les chiffres fournis sont souvent inexacts. Dans le premier cas, ils sont parfois surévalués afin de mettre en valeur le haut taux de technicité du pays concerné. Dans le second, ils sont quelquefois manipulés pour des raisons de confidentialité et de concurrence.

Quoi qu'il en soit, ces évaluations, même inexactes, n'en recouvrent pas moins une réalité industrielle. Il y a sans doute une forte corrélation entre le nombre de robots installés dans une entreprise ou dans un pays et le niveau d'automatisation correspondant. D'où l'importance des données relatives aux robots, même si d'autres « composants d'automatisation » présentent également un intérêt indéniable: automates programmables – robots mobiles – manipulateurs simples...

Le parc actuel des robots

En ce qui concerne les robots, les données les plus complètes sont celles fournies par l'IFR (international federation of robotics) réactualisées par l'IPA de Stuttgart.

Sur le tableau I, on constate que l'Europe (au sens large) se place au second rang, loin derrière le Japon mais bien placée devant les USA. La Communauté européenne totalise près de 66 000 unités qui représentent 80,6 % de celles dénombrées en Europe et 18 % des robots installés dans le monde. La figure 6 montre nettement « l'envolée japonaise » avec près de 240 000 robots, mais aussi en Europe la forte poussée en Allemagne qui précède largement l'Italie, la France et la Grande-Bretagne.

La distribution des robots par pays et par nombre de salariés dans l'industrie (fig. 7) fait apparaître une forte robotisation par nombre de salariés pour le Japon, la Suède et la RFA. De 1983 à 1990, le nombre de robots installés au Japon a été multiplié par 8 tandis qu'en Europe et aux USA les facteurs de multiplication étaient voisins (5,8 et 5,6 respectivement).
Il est particulièrement intéressant d'observer la forte croissance des robots en Allemagne durant les 20 dernières années (fig. 8), car cela est certainement

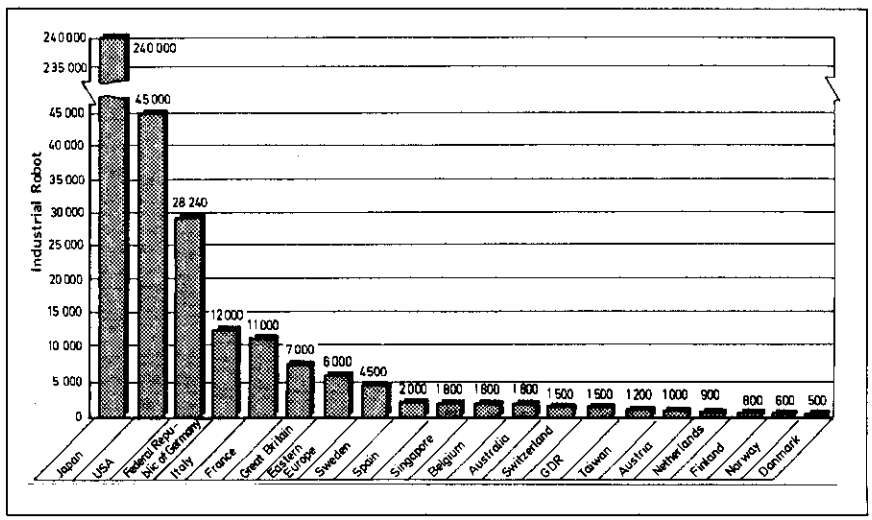

Fig. 6. Distribution des robots par pays (doc. IFF-IPA, déc. 90)

révélateur de l'évolution prévisible dans d'autres pays de la Communauté européenne. Il est évident que cela aura un retentissement sur l'hygiène et la sécurité dans les pays concernés. A partir de 1980, l'évolution est sensible pour aboutir en 1989 à une croissance de près de 27 % par an. On notera toutefois que la France et la Grande-Bretagne ne suivent pas le même développement; malgré un nombre respectable de robots installés (11 000 en France et 7 000 en Grande-Bretagne), ces 2 pays occupent les dernières places si l'on observe la répartition du nombre de robots pour 10 000 salariés.

Domaines d'utilisation des robots en RFA (fig. 9).

Les applications traditionnelles : le soudage point à point, le soudage à l'arc, l'assemblage et la manutention de pièces ainsi que l'association robot-machine outil représentent 75 % des robots installés en RFA en 1990, laissant loin derrière les applications émergentes que sont la peinture, l'encollage, l'ébarbage, le moulage...

Les 4 dernières années renseignent sur la croissance des divers types d'applications (fig. 10). Les pentes significatives de l'accroissement montrent le développement de l'assemblage, de l'association robot-machine outil, de la manutention de pièces en général, du moulage, du soudage à l'arc et de la palettisation. Le soudage point à point continue malgré tout à se développer. Les autres applications (peinture encollage, inspection...), malgré un nombre significatif de robots installés, stagnent encore.

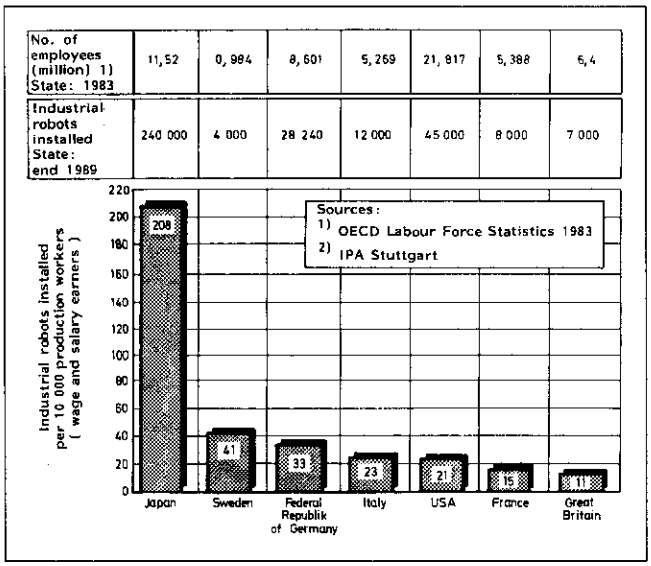

Fig. 7. Distribution des robots par pays et par nombre de salariés (doc. IFF-IPA, déc. 90)

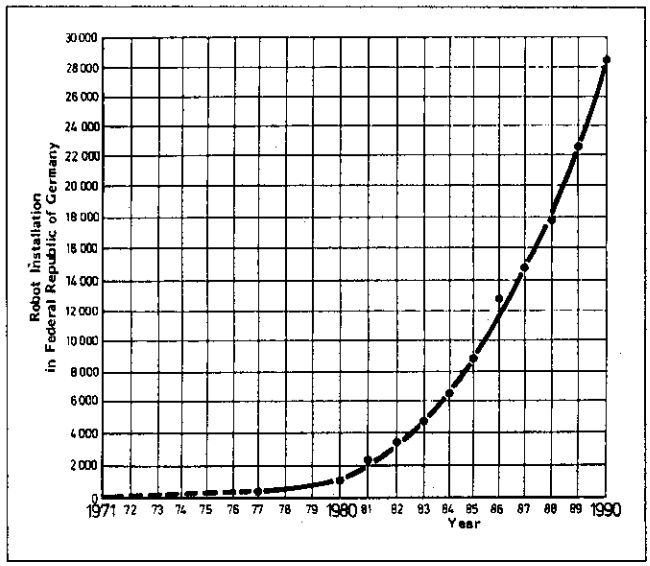

Fig. 8. Evolution du parc des robots en RFA de 1971 à 1990 (doc. IFF-IPA, déc. 90)

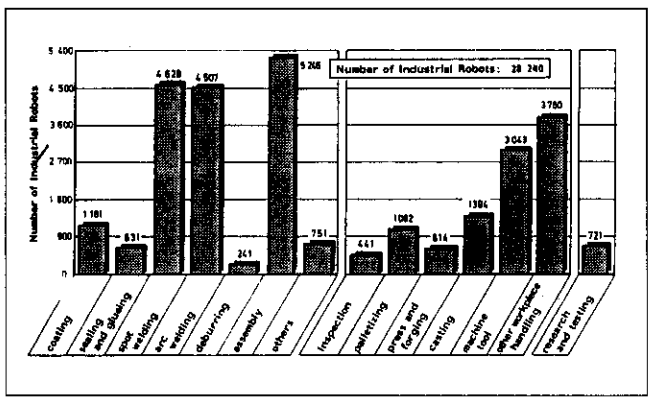

Fig. 9. Domaines d'utilisation des robots en RFA (doc. IFF-IPA, déc. 90)

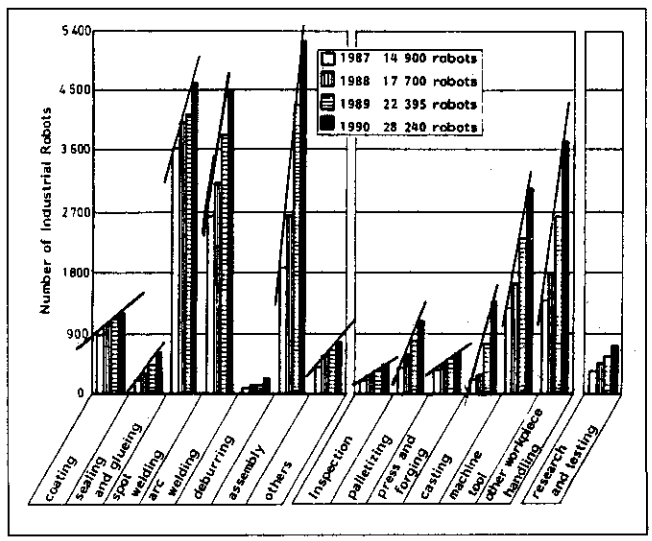

Fig. 10. Robots industriels et leurs applications en RFA (doc. IFF-IPA, déc. 90)

Le parc des ateliers flexibles totaux

En 1985, sur les 200 systèmes de ce type installés dans le monde, environ la moitié sont en Europe et le reste éclaté entre les USA et le Japon. Toutefois, l'investissement moyen par système en Europe est le plus faible.

Le parc des automates programmables industriels (API)

Les statistiques sur les API comptent parmi les plus difficiles à obtenir car la plupart des fournisseurs se sont réfugiés derrière des forteresses administratives internes qui ne facilitent pas une enquête.

Toutefois, pour 1990, la revue *Axes Robotique* de mai 1991 avance un marché mondial se situant entre 15 000 et 17 000 MF, un marché européen dans une fourchette de 7 500 MF à 8 500 MF avec dans ce dernier cas un taux de progression annuel de 9 à 10 %.

Si l'on estime un coût moyen d'automate programmable à 10 000 F (il existe des API à 3 000 F et des systèmes sophistiqués pouvant atteindre 1 MF), on aboutit à un nombre moyen d'API de 1,5 million installés en 1991 dans le monde et près de 750 000 en Europe. Ces estimations rendent compte, malgré leur origine incertaine, de la transformation radicale des systèmes de production.

Encore faut-il ajouter les systèmes spécifiques à base de microprocesseurs (PES), qui sont conçus et réalisés pour une application donnée. Aucun chiffre ne peut être avancé dans ce domaine mais il est certainement beaucoup plus faible que celui des API.

En ce qui concerne ces dispositifs, le problème de sécurité fait l'objet de deux assertions parfaitement antagonistes:

« Les API n'ont jamais été aussi sûrs »

« Pour traiter les sécurités, il est pour le moins dangereux de faire confiance au seul automate »

qui rendent bien compte des problèmes nouveaux que posent les systèmes dits PES: comportement sous défaut interne, comportement en présence de perturbations électromagnétiques, fiabilité et sécurité des logiciels.

Pour répondre à la question principale:

« Puis-je décider en toute quiétude de réaliser l'automatisation de mon processus en faisant appel à des systèmes programmables sans créer de risques pour le personnel chargé de son exploitation ? »,

il est nécessaire de continuer sinon d'engager des études dans ces domaines nouveaux.

Toutefois, il faut mentionner l'existence d'automates programmables dédiés à la sécurité, basés bien souvent sur le principe de la redondance avec en plus renforcement des autocontrôles (ex.: Triconex aux USA, Siemens en Allemagne, Télémécanique en France...). On les trouve bien souvent sur des installations complexes en contrôle de processus. Leur nombre est relativement faible comparé aux API communs.

Le parc des robots mobiles et des chariots sans conducteur

Voilà également un domaine bien difficile à évaluer car il est en pleine extension et recouvre des applications diverses. Il y a tout d'abord le chariot de manutention de pièces sans conducteur dont la tâche est limitée à la manutention. Il faut ensuite mentionner le robot fixe installé sur chariot mobile mais aussi le robot mobile conçu et réalisé pour se mouvoir dans l'usine avec une grande autonomie.

Les quelques chiffres indicatifs en notre possession sont ceux de l'institut américain Ensighs qui estime le marché américain à 8 milliards de dollars pour 1993 et annonce que 10 % des robots fabriqués annuellement dès le début de cette décennie devraient être installés sur un chariot mobile. Cette prévision, si elle était vérifiée, aurait des conséquences importantes sur le niveau de risques dans les usines et par conséquent sur la prévention à mettre en œuvre.

Nous pouvons citer un autre chiffre, national celui-là, concernant les chariots filoguidés installés en France, qui seraient de l'ordre de 3 000.

2.2. Grandes tendances prévisibles à court et moyen terme

2.2.1. La robotique en combinaison avec les nouvelles technologies doit être considérée sous trois aspects: les nouvelles techniques de production robotisée, l'aspect concernant le développement du robot proprement dit et les applications à de nouveaux domaines.

Nouvelles techniques de production

L'emploi de ***lasers de puissance comme outil de découpage***, de soudage, mais aussi pour graver ou traiter par effet thermique des matériaux en surface est en forte progression. Depuis plusieurs années, les sources laser sont devenues plus compactes afin de faciliter leur implantation, voire leur intégration directe dans les machines (2).

Lorsqu'il s'agit de travailler à froid, sans modifier les propriétés mécaniques et physiques des matériaux, la ***découpe par jet d'eau hyperbare*** est actuellement la technique la plus appropriée, capable de s'imposer là où le laser n'est pas adapté. Chargée d'abrasifs, l'eau peut ainsi couper acier, pierre, composite ou tout autre objet solide avec une grande précision.

Cependant, lorsque les cadences ne sont pas trop rapides, la ***découpe plasma-oxygène*** présente également certains avantages.

Développement des robots proprement dits

Le développement du robot se poursuit d'une part dans le domaine de l'amélioration des performances: vitesse,

(2) Le développement récent des lasers solides YAG offre aujourd'hui la possibilité de conduire le faisceau par fibres optiques, ce qui permet de les associer aisément à des robots industriels polyarticulés selon 6 axes. Les équipements de découpage laser sont d'ailleurs variés: des petites machines de la taille d'une fraiseuse verticale, sur lesquelles une tête fixe dirige le faisceau laser vers un banc, en passant par des lasers adaptés sur de grands portiques, jusqu'à des systèmes très souples, dont le laser est monté sur le terminal du robot.
Les robots de découpage sont traditionnellement des lasers de classe 4. Toutefois, une conception soignée de l'enceinte peut autoriser la classe 2. Dans certains types de lasers, tels ceux montés sur portique à mouvement libre en XY et limité en Z, il est possible de réaliser des enceintes de classe 1 en utilisant un écran de protection rapprochée autour de la sortie du faisceau. Très souvent, on a recours à des barrières de sécurité installées autour du banc de la machine; elles assurent également une protection contre des dangers d'ordre mécanique.
Pour un système dans lequel la tête émettrice est fixée en position verticale et dirige le faisceau vers le bas, il est relativement simple de s'assurer que le laser bénéficie d'un confinement sûr: on peut aménager des obturateurs physiques et des interrupteurs-limiteurs pour éviter toute mise en service du laser s'il n'est pas au-dessus du banc, la partie inférieure de ce dernier pouvant être conçue de manière à ne pas réfléchir le faisceau et à y résister.

accélération, charge nominale transportée, meilleure manutention...) et d'autre part par l'addition de nouveaux moyens tels que : intelligence artificielle (reconnaissance de comportements, systèmes experts...), appréhension de l'environnement (vision, sensations de froid, de résistance...), locomotion (robots autonomes, sur rail, guidés automatiquement...), commande mixte (commande par programme, commande manuelle, télémanipulation).

Applications de l'automatisation à de nouveaux domaines, dans de nouvelles branches de l'industrie

A l'origine, les première applications de la robotique sont apparues dans l'industrie automobile en Europe, aux USA, au Japon. Ce développement se poursuit et s'intensifie dans la mesure où des fonctions qui étaient restées manuelles sont automatisées.

Toutefois, on assiste également à une entrée de la robotique dans les secteurs suivants : le bâtiment et les travaux publics, l'agriculture et la sylviculture, l'extraction minière, la construction navale, le recyclage, les services publics (hôpital, nettoyage, réparation et inspection d'installations publiques : ponts et routes), les stations de remplissage, l'espace, l'industrie alimentaire (conditionnement, abattoir, boucherie...), les travaux sous-marins.

2.2.2. Les applications des robots mobiles autonomes (RMA)

En ce qui concerne l'***industrie nucléaire***, l'application est une obligation liée à l'effet Tchernobyl. Dans ce cas, il s'agit de faire évoluer un robot mobile en environnement nucléaire pour des opérations de maintenance, d'installation, de stockage et de manutention de déchets nucléaires. Un problème rencontré est celui de la tenue aux rayonnements des systèmes électroniques en particulier des mémoires. L'utilisation de l'arséniure de gallium comme matériaux est fort prometteuse. En raison des cages de Faraday que constituent les enceintes de confinement, il n'est pas possible d'utiliser des liaisons radioélectriques, d'où l'obligation actuelle du « fil à la patte ».

Le domaine du ***nettoyage*** est également très convoité. Bien que l'introduction du robot mobile ne soit pas une « obligation absolue », toutes les grandes sociétés de nettoyage sont sensibilisées à cette révolution. Des robots mobiles sont déjà utilisés pour le nettoyage des quais du métro à Paris, bientôt des voûtes et des voies. Le nettoyage des grands ensembles tels que la pyramide du Louvre est traité en partie par un RMA (robot mobile autonome). D'après les experts, les RMA devraient se développer dans ce secteur mais il y a toutefois des problèmes délicats à résoudre tels que la fiabilisation de ces robots et la formation du personnel appelé à les conduire. Actuellement, les opérateurs sont des ingénieurs ! Si l'on veut éviter un rejet de ce type de nettoyage, il faudra former à la conduite le personnel actuellement chargé du nettoyage par des moyens traditionnels.

Dans les ***mines***, ils sont déjà utilisés à titre expérimental pour le perçage de parois et le placement d'explosifs.

Sur les ***chantiers du bâtiment***, cette introduction est une éventualité. Les facteurs qui militent dans ce sens sont :

- les dangers sur les chantiers (les dernières statistiques d'accidents sur chantiers en France montrent l'urgence d'actions, dans ce domaine) ;
- la difficulté du recrutement de personnel ;
- la qualité du produit demandé ;
- la maintenance.

C'est ainsi que des tentatives sont faites d'une part dans le déplacement de charges (masses de 50 kg à de longues distances) et d'autre part dans le déplacement d'outils : lissage de dalles et ponçage de balèvres (aspérités des plafonds et des murs). Des prototypes sont également disponibles pour la manutention de barres de béton, la peinture et l'ignifugeage de poutres métalliques.

En ***travaux routiers***, il y a déjà mécanisation très importante sur les chantiers.

2.2.3. Applications exemplaires de robotique avancée

Lors d'un sommet de l'OCDE en 1982, il a été convenu que la robotique avancée devrait faire spécifiquement l'objet d'un ***programme international de robotique avancée*** (IARP). Dans le cadre de ce programme, on a listé un éventail de domaines d'application non industriels, pour lesquels les robots industriels existants n'étaient pas adaptés. Il fallait développer une nouvelle génération de robots avancés, capables de travailler de façon autonome dans des environnements non structurés. Ces robots devraient être intelligents, dotés de capacités de détection et aptes à prendre des décisions en temps réel ainsi que des mesures adéquates pour faire face à des situations imprévues. Il existe plusieurs projets en collaboration sur le plan international, dans les domaines suivants : construction de tunnels (dont l'exploitation minière), génie civil et construction, applications sous-marines, médecine, sécurité et lutte contre l'incendie, applications domestiques. L'annexe 1 liste un certain nombre de projets pilotes en cours d'étude.

2.3. Conséquences possibles au niveau de la sécurité

La robotique et l'automatisation d'une façon générale ont une incidence sur l'hygiène et la sécurité (tableau II).

TABLEAU II

Effet de la robotisation

Aspects négatifs	Aspects positifs
Perte de travail ou perte d'un savoir-faire ou maintien de tâches manuelles résiduelles	Création d'un nouveau travail plus qualifié (maintenance, programmation...)
Transfert à un travail identique conservant un stress de même nature ou changement de type de stress et de l'intensité correspondante (passage d'un stress physique à un stress mental)	Réduction de l'effort physique Réduction du stress mental (élimination de la monotonie du poste à cycle de travail fixe)
Isolations sociale et physique	
Augmentation des mutations de postes	Diminution des mutations de postes (les mutations de production ne concernent pas l'homme)
Nouvelles sources de risques créées par le robot	Elimination des zones à risques (presse-forge...)

Il ne peut en être autrement puisqu'il s'agit d'une modification importante des moyens de production dans les industries manufacturières. Cette influence peut se révéler positive ou négative selon les cas. Bien que la robotique soit principalement appliquée dans le but d'atteindre une meilleure productivité industrielle, il est indéniable, en outre, qu'elle permet une transformation du travail et, par voie de conséquence, qu'elle permet d'espérer une amélioration des conditions de celui-ci.

En revanche, la robotique, par sa nature même ou en raison de moyens insuffisants de prévention mis en place, peut entraîner des contraintes pour l'homme et même des risques nouveaux dont on commence à appréhender la nature et les conséquences.

Aspects positifs : la robotique comme moyen de promotion de la prévention

Contrairement aux machines semi-automatiques, comme les presses par exemple, qui nécessitent une présence humaine dans leur voisinage, les robots industriels durant leur phase automatique fonctionnent hors présence du personnel. ***Cette technique conduit donc à éloigner l'homme des machines et des produits traités.*** Cet éloignement est en soi un facteur de sécurité. Rappelons que sur les presses à travailler le métal à froid, l'accident est consécutif à la coïncidence entre la descente de l'outil et l'entrée de la main de l'opérateur dans la zone de travail. Cette coïncidence est liée à des dysfonctionnements au niveau de la machine ou des protecteurs. La robotique et, de façon générale, l'automatisation des moyens de production éliminent naturellement les risques mécaniques durant les phases automatiques du robot. Cet éloignement de la zone de travail du robot n'est cependant pas systématique et une présence humaine inopportune est toujours à redouter.

Sur les machines traditionnelles, les facteurs, responsables d'accidents ou de maladies professionnelles, peuvent être classés en ***cinq groupes de facteurs***: physiques, chimiques, biologiques, physiologiques, psychologiques (cf. encadré n° 2).

Il est connu que ***la robotique a une influence positive sur la qualification du personnel.*** Une étude menée en Allemagne par la société Audi dans ses usines le confirme. Avant l'introduction de la robotique, il y avait seulement 25 % de personnel qualifié en métallurgie contre 65 % sans qualification et 10 % qualifié mais dans d'autres spécialités. Après l'introduction de la robotique, il y a 5 % de spécialistes (programmeurs-dépanneurs), 60 % de personnel qualifié en métallurgie et seulement 35 % sans qualification. Malheureusement, nous n'avons pu obtenir aucune indication quant au nombre d'employés avant et après l'introduction de la robotique. Mais nous pouvons être sûrs que le nombre « après » est plus faible.

ENCADRÉ N° 2

Facteurs physiques, chimiques, biologiques, physiologiques et psychologiques de risques

Facteurs physiques :

- émission de poussières ou de gaz dans la zone de travail,
- température de la surface du matériel ou de l'équipement,
- température de l'air dans la zone de travail,
- bruit au poste de travail,
- vibrations,
- infrasons,
- ultrasons,
- humidité de l'air,
- mobilité de l'air,
- ionisation de l'air,
- niveau de radiations ionisantes dans la zone de travail,
- tension dans le circuit électrique avec risque de contacts directs ou indirects,
- niveau d'électricité statique,
- niveau de rayonnement électromagnétique,
- champ électrique,
- champ magnétique,
- éclairement,
- intensité de la lumière,
- contraste réduit,
- réverbération lumineuse directe,
- pulsation du flux lumineux,
- niveau de rayonnement infrarouge.

Facteurs chimiques :

ils sont liés à l'effet de produits chimiques qui peuvent pénétrer dans l'organisme humain par l'appareil respiratoire, le système digestif ou éventuellement à travers le revêtement cutané. En fonction de leur action sur l'organisme, les sous-groupes suivants sont recensés :

- les toxiques généraux,
- les irritants,
- les sensibilisants,
- les cancérogènes,
- les mutagènes exerçant une influence sur la fonction de reproduction.

Facteurs biologiques :

ils sont inhérents à des objets biologiques dont l'action sur les personnes peut provoquer des maladies (lubrifiants, huiles de coupe, produits pour nettoyage et lavage de pièce...).

Facteurs physiologiques :

- surcharge statique (attitude – posture),
- surcharge dynamique (efforts liés à une action sur un levier, lors d'opérations de manutention...).

Facteurs psychologiques :

sous certaines conditions de travail, ils entraînent une surcharge neuro-psychique. Une robotisation adéquate devrait pouvoir empêcher que ces facteurs puissent avoir une influence néfaste sur le personnel et risquent d'entraîner des accidents ou des maladies professionnelles.

Aspects négatifs : les risques inhérents au système homme-robot

Un robot est un système automatique ne nécessitant pas la présence humaine pour effectuer un travail donné. Toutefois, l'homme n'est pas systématiquement évincé de son environnement ; il intervient à divers moments durant des phases variées de la vie du robot. Ces phases sont les suivantes :

– la première animation chez le constructeur,

– l'apprentissage (apprentissages direct, par syntaxeur, par télécommande),

– la vérification de trajectoire,

– le réglage,

– l'entretien,

– le dépannage,

– le dépistage de dysfonctionnement.

Durant toutes ces phases, l'homme peut être en relation normale ou accidentelle avec les parties mobiles du robot. Le personnel susceptible de l'approcher peut être identifié de façon non exhaustive:

– les techniciens chez le constructeur,

– les opérateurs lors des opérations d'apprentissage,

– les régleurs et techniciens spécialisés (en soudure par exemple),

– les personnes travaillant sur d'autres machines à proximité du robot,

– les visiteurs,

– le personnel distrait.

Dans la plupart des cas, on aboutit à un système « homme-robot » plus ou moins complexe mettant en contact un homme avec un robot et ses prolongements (pince, outil, pièce manipulée).

Les robots ne créent pas de risques vraiment nouveaux par rapport à des systèmes traditionnels comportant des organes en mouvement. Toutefois, la présence d'énergies très importantes et le déplacement d'organes mobiles animés de mouvements rapides (2 à 10 m/s), parfois imprévus, créent des ***conditions spécifiques d'accidents.***

• *Collision:* une personne peut être blessée, lors du mouvement du robot, par une partie de celui-ci (le bras par exemple), une pièce en cours de manipulation ou par un outil solidaire du bras.

• *Projection:* une personne peut être atteinte par une pièce lâchée ou projetée par le robot. Elle peut être blessée également lors de la projection de métal fondu (fonderies).

• *Coincement:* une personne peut être coincée et blessée à l'occasion de mouvements du robot entre le bras de ce dernier et des obstacles fixes (protecteurs fixes – autres machines...).

• *Risques traditionnels dus à la reprise en manuel:* pour certains équipements robotisés, il est prévu la possibilité d'une reprise en manuel à l'occasion de pannes du dispositif. Cette possibilité, bien qu'exceptionnelle, recrée les conditions d'insécurité primitives, inhérentes à l'ancien système. Les risques sont toutefois amplifiés par le fait que le personnel exerçant la fonction de surveillance n'a plus forcément l'expérience passée. On se retrouve confronté à une situation comparable à l'occupation d'un poste dangereux par un opérateur inexpérimenté.

• *Autres risques:* cette dernière catégorie concerne davantage l'application, c'est-à-dire brûlures, rayonnements divers, coups d'arc...

• En ce qui concerne les *robots mobiles,* les risques sont de même nature que pour les robots à poste fixe. On retrouve principalement les risques de collision, de coincement, mais l'espace « ouvert » de débattement rend la probabilité d'occurrence plus importante, dans la mesure où le robot n'est pas confiné dans un « espace spécifique » mais peut évoluer dans l'espace « ouvert ».

2.3.4. Considérations nouvelles

Les considérations précédentes ne sont pas exclusivement réservées à l'automatisation d'hier et d'aujourd'hui, la plupart demeurent valables pour le futur. Toutefois, de nouveaux aspects doivent être ajoutés afin de tenir compte au mieux des évolutions en cours.

Le cœur du problème du point de vue de la sécurité est inhérent à ***l'hétérogénéité des sous-systèmes*** liés à l'existence de différents types de sous-systèmes:

– anciens (couplés avec difficulté à des sous-systèmes récents),

– à bas niveau de sécurité,

– prototypes pas encore éprouvés.

L'usine de demain sera certainement un lieu où de plus en plus de ***travailleurs isolés*** cotoieront des systèmes dangereux. On parle de travailleur isolé quand il y a conjonction de l'isolement et d'une situation à risque. Même si ce problème évolue de pair avec l'automatisation, il n'en est cependant pas une composante spécifique. Ce problème a fait l'objet de deux notes documentaires publiées par l'INRS. Les solutions sont de type organisationnel et de type technique (dispositifs d'alarme pour travailleurs isolés utilisant des capteurs de perte de verticalité et/ou de perte de mobilité).

L'automatisation fait de plus en plus appel à l'ordinateur intensifiant la nécessité d'un interfaçage entre l'homme et le système à tous les niveaux du système (sous-système robot, sous-système machine, sous-système ordinateur...).

En fait, l'introduction des nouvelles techniques et technologies change ***la nature de la fatigue subie par l'homme,*** cette dernière ***devient mentale et psychique.*** Comme énoncé par R. Troxler (SUVA, Suisse), à l'occasion du colloque de l'AISS (Association internationale de la sécurité sociale) en mai 1988 à Friedrichshafen, l'aménagement organique du travail sur écrans et postes de commande ou plus exactement la présentation de l'information revêt une importance de plus en plus grande afin de minimiser les erreurs d'information et de signalisation, donc les risques.

L'outil de l'automaticien, devenant de plus en plus l'écran de visualisation, il est à craindre une ***augmentation de la fatigue visuelle*** des opérateurs. Ce problème est déjà bien connu pour les secrétaires et d'ailleurs de tout personnel utilisant des systèmes de traitement de textes. Il est cependant à craindre, si l'on n'y prend garde une augmentation du risque.

Il faut toutefois démystifier ce risque en le limitant au problème de lumière et de contraste en éliminant les risques secondaires que représentent les rayonnements non ionisants et ionisants (dont le niveau est faible).

Au § 1.3, nous avons insisté sur l'***importance des interconnexions*** tant dans une coupe verticale (avec interconnexions entre les diverses composantes: fabrication, gestion, qualité assistées par ordinateur, que dans une coupe horizontale entre transport, manutention...

Il faut également insister sur ***le couple homme-système*** qui ***pose également des problèmes d'interfaçage*** dans les modes automatiques mais encore plus dans les modes d'interventions (réglage, programmation, dépistage de défauts...).

Dans la mesure où l'on tend vers une automatisation intégrée du système de production, il est impératif d'intégrer la sécurité dans cette démarche globale. ***Il faut*** donc ***préconiser une démarche de type SAO*** (sécurité assistée par ordinateur).

Dans cette optique, deux approches sont possibles, soit l'utilisation de dispositifs de protection électronique (caméra vidéo, barrages...) supervisés par ordinateur, soit directement la gestion

de la sécurité par un ordinateur spécialisé ou un ordinateur central en supposant résolus tous les problèmes de sécurité positive relatifs à cette technologie.

L'automatisation se développe très rapidement dans nos pays industrialisés. Les nouvelles techniques et technologies présentent souvent des risques élevés pouvant souvent induire des accidents dramatiques: les mouvements des robots sont amples (en robotique fixe), rapides, imprévus (pour l'homme dans les cas de robots complexes et surtout de robots mobiles). Les fonctions associées aux manipulateurs pourront être elles-mêmes dangereuses par exemple dans le cas de l'utilisation de sources laser. De plus, l'usine devient complexe, la prévention également, *il convient* donc ***d'assurer une formation convenable du personnel*** tant du point de vue connaissance des systèmes concernés que de celui de la prévention des risques associés.

Cet aspect n'est bien sûr pas nouveau, il n'en prend pas moins avec ces systèmes complexes de production un aspect primordial.

3. ACCIDENTS ET INCIDENTS IMPLIQUANT ROBOTS ET ENSEMBLES AUTOMATISES

3.1. Fréquence et gravité des accidents et incidents connus

En remarque préliminaire, il faut constater qu'il n'y a pas de statistiques générales et précises mais quelques enquêtes limitées aux pays suivants: Allemagne, France, Grande-Bretagne, Suède, Japon. Toutefois ces dernières, bien qu'incomplètes, fournissent des informations fort intéressantes sur l'accidentologie en automatisation, même si les classifications diffèrent selon les pays et empêchent parfois une comparaison aisée. On notera de nombreuses caractéristiques communes.

3.1.1. Accidents et incidents relatifs à l'automatisation en général

En Allemagne

P. Nicolaisen (Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart) a étudié en 1984 une série de 170 accidents et incidents survenus dans le monde, impliquant des robots ou d'autres machines associées (tableaux III et IV).

TABLEAU III

Accidents et incidents relatés par P. Nicolaisen

Désignation	N	Remarques
Rapport d'accidents impliquant les robots industriels et les systèmes associés	54	15 dus à une protection insuffisante
Rapports d'incidents impliquant les robots industriels et les systèmes associés	94	18 dus à une protection insuffisante
Rapports d'accidents impliquant des machines de structure semblable à celle des robots industriels	13	
Rapports d'incidents impliquant des machines de structure semblable à celles des robots industriels	9	
Total	170	

TABLEAU IV

Causes des 170 accidents ou incidents relatés par P. Nicolaisen

Cause	N	Remarques
Demarrage soudain et non programmé	39	
Non arrêt de la machine ou du robot	50	
Mouvements incontrôlés	56	dont 13 (4 accidents et 9 incidents) impliquant le système de commande
Incidents impliquant la pince ou l'outil	25	
Total	170	

N = nombre d'accidents ou d'incidents.

En Suède

J. Carlsson, quant à lui, rapporte les résultats d'une enquête effectuée en Suède pendant la période 1979-1983. Elle concerne au total 36 accidents dont la répartition en fonction des divers paramètres est présentée dans les tableaux V à VIII. La plupart de ces accidents impliquent des manipulateurs et non pas directement des robots industriels au sens strict. Leur degré de gravité est faible à moyen (1 à 17 jours d'arrêt). Cependant, J. Carlsson note que certains de ces accidents auraient pu avoir des conséquences graves et même dramatiques. Le réglage en cours d'opération et la réparation sont responsables de plus de 80 % des accidents relatés. Cela montre que les accidents en robotique ne surviennent pas généralement durant des conditions normales d'exploitation mais suite à des aléas de fonctionnement.

Au Japon

Le ministère du Travail du Japon a procédé de son côté à une étude des accidents impliquant des robots industriels. Elle concerne la surveillance de 190 usines qui utilisent des robots dans le processus de production. Elle recense 13 incidents, sans conséquences dramatiques, où toutefois des situations de presqu'accidents sont apparues et 11 accidents dont 2 mortels (tableau IX). En fait, jusqu'à fin 1984, 5 accidents mortels sur robots et 11 sur machines à commandes numérique se seraient produits au Japon (compte rendu de mission, rapport interne du Laboratoire national d'essais).

TABLEAU V

Activité de l'accidenté au moment de la collision (d'après J. Carlsson

Evénement / Activité	Collision avec la charge ou une partie de la machine	Autres événements	Total
Réglage en cours d'opération	14		14
Mouvement vers le robot, arrêté dans une position inattendue, et heurt contre celui-ci	1	1	2
Maintenance, programmation	13	2	15
Divers (non précisé)	3	2	5
Total	31	5	36

TABLEAU VI

Répartition des accidents en fonction de la spécialité de l'accidenté (d'après J. Carlsson)

Spécialité de l'accidenté	N
Réparateur - régleur - contremaître	12
Opérateur - autres personnes	24
Total	36

TABLEAU VII

Incidents impliquant les robots industriels

Phase dans laquelle l'incident est arrivé	N
En cours d'apprentissage	5
En cours d'opération	4
En cours d'inspection	2
En cours de réglage	1
En cours de nettoyage	1
Total	13

TABLEAU VIII

Accidents en fonction du siège des lésions (d'après J. Carlsson)

Siège des lésions	N
Doigt	12
Main	7
Bras	2
Dos	4
Tête	6
Cou	1
Jambe	2
Côtes	1
Dents	1
Total	36

TABLEAU IX

Accidents impliquant les robots industriels (d'après le ministère du Travail japonais)

N°	Année d'occurrence	Circonstances de l'accident	Degré de gravité	Situation de travail
1	1978	Un ouvrier qui déplaçait une pièce mal usinée, située sur un tapis roulant, fut entraîné par le robot lorsque le dispositif de fin de course fut mis en œuvre	Décès	En cours d'opération (aléa de fonctionnement)
2	1981	Après un réglage, le commutateur de démarrage fut poussé ; le manipulateur qui était vers l'arrière a avancé et a coincé l'ouvrier contre la machine	Décès	En cours de réglage
3	1978	Un robot de soudage se mit en mouvement de manière intempestive en cours d'opération. L'ouvrier, qui pénétrait à ce moment-là dans la zone d'opération, fut projeté par le manipulateur contre la machine	7 jours d'arrêt	En cours d'opération (aléa de fonctionnement)
4	1981	Les protecteurs avaient été enlevés sur le robot pour un réglage. La main de l'ouvrier fut entraînée lorsqu'il souleva une pièce	3 jours d'arrêt	En cours d'opération (absence de protecteur)
5	1979	Suite à un aléa de fonctionnement du robot que l'ouvrier tenta de réparer sans couper l'alimentation, sa main fut coincée entre le manipulateur et la pièce en cours d'assemblage	Pas d'arrêt	En cours d'opération (aléa de fonctionnement)
6	1979	Durant l'inspection d'un robot, le manipulateur se mit à fonctionner de façon erratique et heurta la main de l'ouvrier	Pas d'arrêt	Durant une inspection
7	1981	Pendant l'apprentissage du robot, le manipulateur se mit à fonctionner de façon erratique et percuta le corps de l'ouvrier	Pas d'arrêt	Durant l'apprentissage
8	1981	Alors qu'un ouvrier s'apprêtait à nettoyer un équipement annexe dans la zone opérationnelle du robot sans couper l'alimentation, sa main fut heurtée par le manipulateur	Pas d'arrêt	En cours d'opération (durant un nettoyage partiel)
9	1981	Un robot d'assemblage était en cours de réparation quand il démarra soudainement ; la main du travailleur fut heurtée	Pas d'arrêt	En cours de réparation
10	1981	Un robot d'assemblage était en cours de maintenance quand un assistant de l'ouvrier mit en route le robot. Le manipulateur heurta la main de l'ouvrier	Pas d'arrêt	En cours de maintenance
11	1982	L'ouvrier utilisait une soufflette pour dégager les copeaux d'un tour sur lequel les pièces étaient transportées par le robot, lorsque sa main fut coincée entre le robot et la pièce	Pas d'arrêt	En cours d'opération (lors d'un nettoyage partiel)

En France

Une enquête sur 54 accidents survenus entre 1983 et 1988 a été menée par questionnaire fermé.

L'analyse des données recueillies a permis de fournir les principaux indicateurs de ces accidents à savoir la gravité des lésions, l'activité de l'accidenté, le siège de la lésion, l'état de marche du système lors de l'accident, la catégorie du personnel accidenté et le système à l'origine de l'accident (fig. 11).

En Grande-Bretagne

Une étude plus récente a été menée sur 284 accidents survenus entre le 1er avril 1987 et le 31 mars 1991. Cette étude générale concernant l'automatisation comprenait des machines et systèmes à commande numérique, des cellules robotisées des lignes de robots et des véhicules guidés automatiquement. Elle apporte un nouvel éclairage fort intéressant. On dénote 26 % d'accidents graves et 1,8 % d'accidents fatals. 80 % des accidents concernent les opérateurs et seulement 13 % le personnel de maintenance. 61 % se produisent durant des interventions liées au cycle opératoire tandis que 31 % résultent d'interventions de réglage, de maintenance et de réparation. Près de 50 % des accidents se produisent quand la machine est en mode automatique. Dans 80 % des cas, les systèmes de protection se sont révélés inadéquats et dans 65 % ce sont les spécifications de sécurité qui n'étaient pas correctes. On notera que dans 50 % des cas, les facteurs humains étaient significatifs.

Commentaires

On constate un certain nombre de convergences avec les résultats de l'étude française, même si certains facteurs ne sont pas toujours comparables. Cela est dû certainement à des données de nature quelque peu différente. En particulier, les accidents rapportés en France ne le sont qu'au-delà d'un certain seuil de gravité, d'où l'absence des accidents mineurs.

Les conclusions demeurent pour l'essentiel les mêmes: gravité de l'accident – accidents intéressant toutes les parties du corps humain – survenant à l'occasion d'une intervention ou suite à un aléa de fonctionnement. On notera également dans l'enquête britannique, l'importance du facteur humain dans la genèse de ces accidents, donc l'importance à accorder à la formation. En outre, on devra être attentif au fait que la prévention technique et les spécifications de sécurité sont souvent insuffisantes et expliquent, en partie au moins, l'accident.

En données complémentaires, sur les 284 accidents recensés: 52 sont survenus lors de mouvements programmés; 20 lors de mouvements enchaînés; 33 suite à l'actionnement pour des causes diverses de capteurs; 42 suite à des mouvements intempestifs; 40 suite à une consignation défaillante; 26 suite à une défaillance de systèmes de sécurité (fig. 12).

Une étude allemande conduite par le BIA, sur 83 accidents consécutifs à la défaillance du système de commande, apporte un complément utile d'informations sur l'accident d'automatisation (fig. 13).

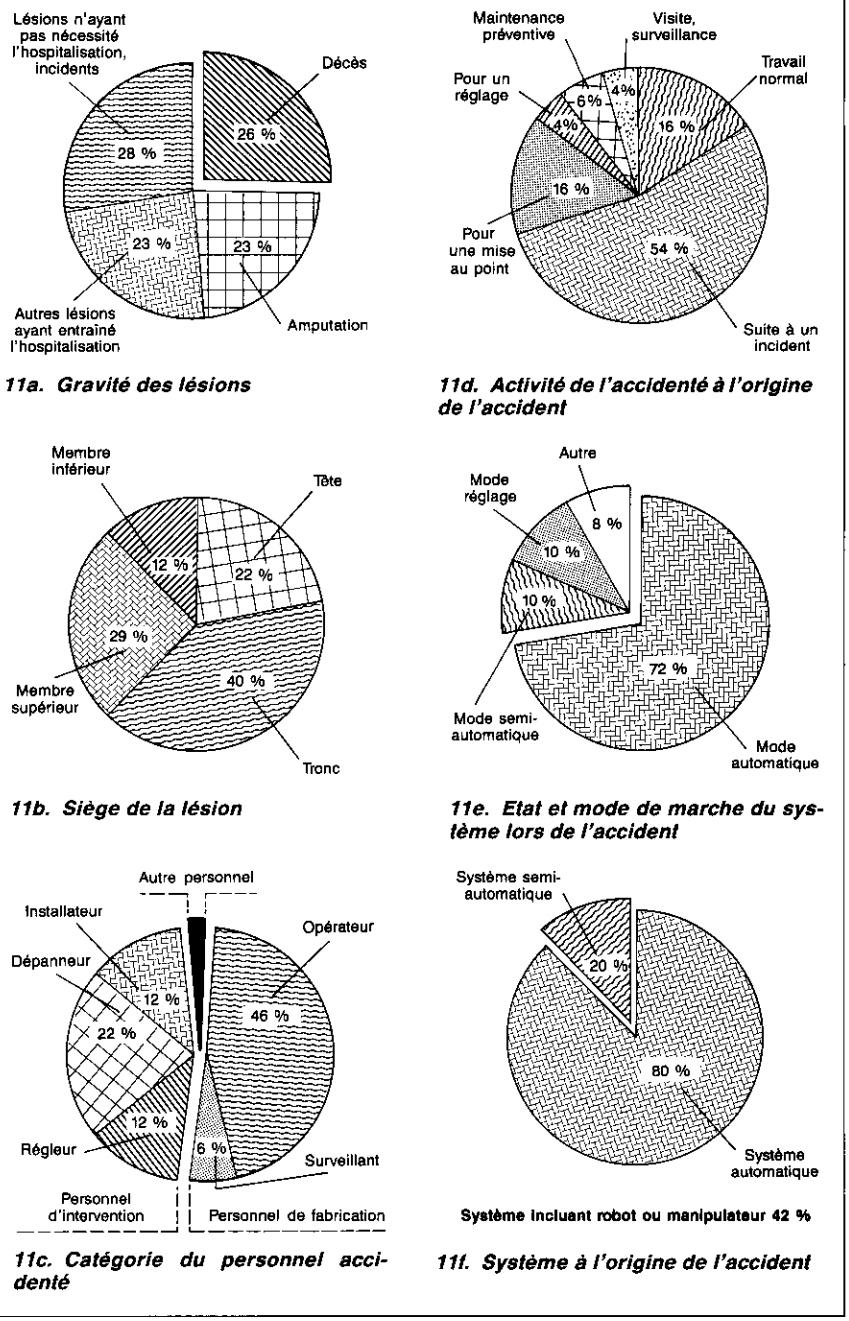

Fig. 11. Résultats de l'enquête réalisée en France sur 54 accidents survenus entre 1983 et 1988

Interventions mineures intégrées au cycle opératoire ou destinées à garder la machine en opération (174, soit 61 %)	
Déblocage suite à aléas	48 (17 %)
Alimentation	37 (13 %)
Nettoyage	33 (11,6 %)
Réglage de machine/pièce	24 (8,5 %)
Opération normale	27 (9,5 %)
Mesurage	5 (1,8 %)
Interventions majeures en relation avec la mise en œuvre de la machine ou suite à des aléas (88, soit 31 %)	
Dépistage de fautes et entretien	27 (9,5 %)
Mise au point	26 (9 %)
Rectification de fautes et entretien	27 (9,5 %)
Mise en œuvre	6 (2,1 %)
Changement de programme	2 (0,7 %)
Autres (22, soit 8 %)	
Autre	5 (1,8 %)
Personne étrangère au site	5 (1,8 %)
Non connue	12 (4,2 %)

Siège de la lésion N = 284	
Doigt	114 (40,1%)
Main	53 (18,7 %)
Bras	35 (12 %)
Pied	9 (3,0 %)
Jambe	16 (5,6 %)
Tronc	25 (9 %)
Cou	4 (1,4 %)
Tête	11 (3,9 %)
Non spécifié	18 (6,3 %)

Etat et mode de marche du système lors de l'accident N = 284	
Automatique	139 (48,9%)
Manuel	36 (12,7 %)
Vitesse très réduite	5 (1,8 %)
Stoppé (non consigné)	54 (19 %)
Stoppé (isolé ou arrêt d'urgence)	10 (3,5 %)
Stoppé (avec système de sécurité)	25 (8,8 %
Programmation	2 (0,7 %)
Non identifié	13 (4,6%)

Protecteurs répertoriés «inadéquats» N = 221	
Sans protecteur	58 (26 %)
Protecteur enlevé	8 (3 %)
Protecteur enlevable ou mobile non verrouillé	17 (7,6 %)
Ouvertures non protégées dans une enceinte	9 (4 %)
Protecteur ou dispositif de sécurité permettant l'accès à des parties dangereuses	49 (22 %)
Spécifications du système de sécurité et sa conception insuffisantes	46 (20,8 %)
Dispositif de sécurité neutralisé (légitimement)	13 (5,8 %)
Dispositif de sécurité neutralisé et provoquant des fonctions excessives	4 (1,8 %)
Protecteur fraudé	8 (3,6 %)
Entretien insuffisant du protecteur ou du dispositif de sécurité	6 (2,7 %)
Protecteur créant un risque	3 (1,3 %)

Catégorie du personnel accidenté	Tous accidents N = 284	Dont graves N = 73
Opérateurs	224 (78 %)	50 (68 %)
Equipe de maintenance (électriciens, monteurs, programmeurs)	37 (13,0 %)	15 (21 %)
Direction et surveillance	14 (4,9 %)	3 (4 %)
Ouvriers	4 (1,4 %)	3 (4 %)
Autres (incluant passants, entreprises extérieures)	5 (1,8 %)	2 (3 %)

Fig. 12. Résultats de l'enquête menée en Grande-Bretagne par le HSE

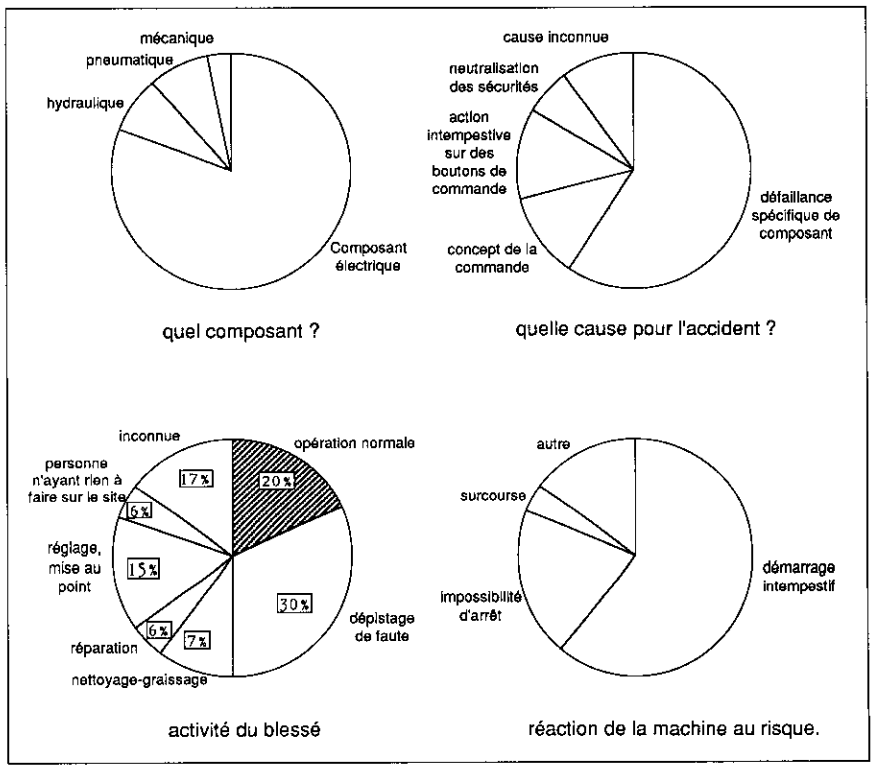

Fig. 13. Résultats de l'enquête menée en RFA par le BIA

3.1.2. Accidents et incidents dus à des véhicules à guidage automatique (VGA)

Une publication récente du ministère du Travail japonais attire l'attention sur ce problème spécifique qui est riche d'enseignements pour l'avenir.

On constate tout d'abord que des accidents graves se sont produits dans ce pays mettant en cause les VGA. 5 cas d'accidents sont relatés dont 3 décès, 1 blessure entraînant plus de 10 jours d'arrêt de travail et 1 blessure légère. Ces chiffres parlent d'eux-mêmes et nous interpellent pour l'avenir en raison du développement de systèmes divers munis de moyens de locomotion (VGA, mais aussi robots mobiles, robots fixes montés sur chariots...).

D'ailleurs, l'enquête japonaise ne se limite pas à cet aspect des choses et relatent un grand nombre d'incidents et de «presqu'accidents» (encadré nº 3).

ENCADRÉ Nº 3

Enquête japonaise recensant des incidents mettant en cause des véhicules guidés automatiques (VAG)

• Un VAG heurte les portes de l'armoire de commande laissée ouverte. • Un VAG passe sous l'arrière d'un camion à l'arrêt, car son pare-choc, situé à un niveau trop bas, n'était pas efficace. • Un chariot en acier inoxydable fournit un mauvais message au capteur d'un VAG. Il lui indique qu'un VAG vient de quitter l'arrêt. Puis un autre VAG se met en route, heurtant le VAG situé en tête. • Un VAG heurte un tour mobile monté sur rails pour des travaux de construction. • Un VAG se prend dans un fil pendant d'une (ligne) située juste au-dessus de ses rails.
• Parce que le sol était mouillé, un VAG glisse dans un virage. • Le capteur d'un VAG ne reconnaît pas une plaque réfléchissante souillée sur le sol, ce qui entraîne une collision.
• Le capteur du pare-chocs ne fonctionne pas à cause de contacts insuffisants. • Un VAG heurte une plate-forme de chargement parce que son barillet était mal réglé.
• Pendant des travaux de chargement avec un chariot élévateur, l'opérateur, s'apercevant de l'arrivée d'un VAG, appuie sur le bouton d'arrêt d'urgence. Celui-ci ne fonctionne pas et le VAG entre en collision avec le chariot élévateur.
• Après un arrêt temporaire, un VAG se remet en mouvement sans donner l'alarme de départ. • L'indicateur de direction d'un VAG ne clignote pas et les personnes se trouvant à proximité prennent peur, ne sachant pas dans quel sens il se dirige.
• Un VAG glisse sur une piste couverte d'huile et percute un poste de chargement.
• Des vibrations inhabituelles provoquées par une roue motrice cassée sont à l'origine d'un déplacement de la charge par inadvertance.
• A la suite d'un problème de freins, deux VAG se percutent. • Les freins d'un VAG tombent en panne unilatéralement, provoquant le tournoiement du véhicule.
• L'utilisation 24 h sur 24 du VAG nécessite le remplacement des piles plusieurs fois par jour. • A la suite d'une baisse de la pile, l'unité de contrôle du VAG ne peut plus fonctionner correctement, ce qui conduit à des dysfonctionnement. • Les piles de tous les VAG se détériorent en même temps, entraînant l'arrêt complet de la production d'une usine.

3.2. Etude de quelques cas exemplaires d'accidents

3.2.1. Cas d'un accident lié à une coactivité homme/automatisme (source japonaise): accident corporel d'une personne écrasée entre un véhicule automatique et un pilier dans une usine de fabrication de papier.

Alors qu'il chargeait des rouleaux de papier non traité sur des véhicules automatiques, puis les fixait sur une machine à enduire (installation destinée à enduire le papier de résine synthétique), un travailleur a eu l'abdomen écrasé entre un véhicule qui arrivait et un pilier.

Lorsque l'interrupteur de mise en route est actionné, les véhicules s'acheminent automatiquement à proximité de l'emplacement où leur charge – un rouleau de papier – doit être placée sur la machine à enduire.

Alors que la victime était occupée à son travail conformément aux modalités prescrites, le véhicule a effectué son virage et s'est rapproché de la machine à enduire. Le travailleur, se penchant au-dessus de la voie à partir du poste situé sur la partie avant droite de cette machine, n'a pas vu le véhicule s'approcher de lui par derrière et a eu le ventre écrasé entre le poteau de câblage et le pilier (9,5 cm entre le deux).

Causes de l'accident

1) La victime se penchait au-dessus de la voie à l'avant du véhicule automatique en cours d'approche.

2) Le dispositif de sécurité sans contact du véhicule était conçu pour émettre un son d'avertissement en cas de repérage de tout obstacle se trouvant dans sa zone dangereuse, mais il n'était pas équipé d'un mécanisme d'immobilisation du véhicule.

3) La console du contrôle du serrage n'était pas installée en un lieu respectant les conditions de sécurité, et aucune protection, telle qu'une barrière, n'était prévue pour éviter le contact entre l'opérateur de cette console et le véhicule.

4) L'espace intermédiaire entre le pilier et le poteau de câblage du véhicule était tel qu'il existait un risque que l'opérateur se fasse coincer entre eux.

5) L'usine disposait d'un ensemble de règles opératoires concernant ce procédé, mais elles n'étaient pas entièrement mises en pratique.

Contre-mesures nécessaires

1) En plus de l'alarme, installer un mécanisme d'arrêt d'urgence sur le véhicule, pour éviter tout contact imprévu avec les travailleurs.

2) Déplacer le pilier pour ménager un espace suffisant avec le poteau de câblage du véhicule et aménager la console du contrôle de serrage en un lieu approprié.

3) Déployer davantage d'efforts pour améliorer le programme de sensibilisation des travailleurs à la sécurité et s'assurer qu'ils suivent plus scrupuleusement les règles opératoires prescrites.

3.2.2. Cas d'un accident lié à une intervention de maintenance (source HSE): accident corporel d'une personne intervenant pour maintenance dans un site de stockage automatisé.

Un système de stockage automatisé étant en panne, un dépanneur pénétra dans le site afin d'identifier le défaut, en l'occurrence un détecteur de position. Suite à la déconnexion de ce composant, un signal électronique fut envoyé à l'armoire de commande, qui eut pour conséquence de mettre en marche le système de stockage. Le dépanneur fut mortellement blessé.

Le système n'avait pas de protections telles que protecteurs fixes entourant l'installation, portes à accès verrouillés. De plus, il n'y avait aucune information au sujet de l'entretien et du dépannage. L'opérateur devait en fait « se débrouiller » pour faire au mieux.

L'accident aurait été évité si d'une part l'on avait procédé à une consignation correcte de l'installation et si d'autre part, dans le manuel d'entretien et de dépannage, l'on avait indiqué clairement les conséquences possibles d'une action sur des composants critiques en particulier sur le détecteur de position.

3.2.3. Cas d'un accident lié à une intervention suite à un aléa de fonctionnement (source INRS): accident corporel d'une personne effectuant une brève opération de nettoyage suite à un aléa de fonctionnement.

Le système comprend un robot alimentant un ensemble automatisé pour coulée automatique de culasses en aluminium à déclenchement de cycle manuel. En cours d'exploitation, l'opérateur a voulu ôter une bavure d'aluminium restée dans le moule avant de relancer le cycle suivant. Pendant ce temps, le système a effectué un nouveau cycle blessant celui qui avait pénétré dans le cycle malgré les consignes.

L'analyse montre à l'évidence plusieurs défauts sur ce système. En particulier, il n'y avait pas de protecteurs mécaniques autour du site ce qui autorisait un accès facile.

De plus, le recyclage (par le bouton relance cycle) ne nécessitait qu'une action manuelle impulsionnelle et non une action maintenue ce qui permettait à la personne de déclencher le cycle suivant tout en pouvant s'introduire sur le site de production.

3.2.4. Cas d'accident lié à une opération de dépistage de faute (source groupe quadripartite): accident corporel d'une personne sur une ligne robotisée de soudage dans l'industrie automobile.

Sur une ligne de soudage, un technicien et un régleur observaient le fonctionnement d'un robot depuis la sortie du flux des voitures, par une ouverture faite dans les protecteurs fixes entourant l'installation. Cette opération de dépistage de fautes était nécessitée par des défauts constatés sur des soudures. En se rapprochant davantage pour mieux observer, ils occultèrent le faisceau de la cellule photoélectrique contrôlant le passage des voitures. Le robot s'arrêta, bien que la situation ne respecta pas la procédure normale d'entrée (qui se faisait par une porte à accès verrouillée). Ils purent commencer à observer les soudures, le robot arrêté. Un des deux hommes informa un électricien travaillant près de là que la cellule avait été franchie mais ce dernier ne comprit pas l'intervention et crut qu'on lui demandait de remettre en marche. Il réactiva la cellule et le robot à l'armoire de commande. Le robot continua son cycle, heurtant l'un des hommes et le projetant sur le second, heureusement sans conséquence fâcheuse.

3.2.5. Cas d'un accident intervenant durant une opération normale de production en automatique (source groupe quadripartite)

Un tour à commande numérique, entièrement clos à l'exception d'une porte et d'une fenêtre d'observation en plexiglass était surveillé à distance par une personne; la vitesse est limitée à 800 tours/min.

La pièce en cours de tournage fut projetée à l'extérieur de la zone après avoir brisé la fenêtre de plexiglass, manquant de peu d'atteindre l'opérateur. L'analyse montra qu'en fait la vitesse réelle était de 2000 tours/min, sans que l'on puisse dire si un dysfonctionnement s'était produit ou si l'opérateur avait délibérément augmenté la vitesse en dissimulant cette action.

Ce type d'accidents est commun et met aussi en cause la solidité des fenêtres d'observation.

3.2.6. Facteurs de risque de différents personnels

Ces diverses études de cas concernent un personnel bien identifié à savoir: régleur-dépanneur-opérateur...

Une étude allemande relatée par l'IPA de Stuttgart tente d'évaluer le facteur de risque pour différentes catégories de personnel en le corrigeant par le temps effectif d'intervention (tableau X).

Cette étude concerne 130 cas d'accidents intervenus en RFA et détermine un facteur de risque:

$R = (F/WT) \times 100$

avec F la fréquence en % des accidentés catégoriels, WT le temps de travail à savoir le rapport de cette durée au temps de production, en %.

3.3. Conclusions partielles

1) En général, les accidents procèdent d'interventions dans les sites de production.

2) Ces interventions peuvent être liées entièrement ou partiellement au cycle opératoire, ou bien sont relatives à des opérations de maintenance, de réparation ou de changement de paramètres.

TABLEAU X

Facteurs de risques catégoriels

Groupe à risque	Fréquence F (%)	Temps de travail WT (%)	Facteur de risque R
Programmeur régleur	57	5	1 140
Equipe de nettoyage	26	5	520
Equipe de réparation	4	5	80
Opérateurs	13	85	15

3) Ces accidents sont souvent causés par une défaillance de conception du système due à des causes diverses:

– les besoins d'intervention n'ont pas été pris en compte, c'est-à-dire que la conception a été pensée seulement pour les opérations normales et pas pour les aléas de production,

– les solutions adoptées ne sont pas appropriées et ne permettent pas des interventions en sécurité ou encouragent même la neutralisation des systèmes de sécurité,

– l'accès demeure possible par conception durant le mode automatique.

4) Les difficultés de production concernant une zone du site peuvent se propager à d'autres parties. Par exemple, la mise en marche d'un convoyeur peut conduire à un démarrage intempestif d'une machine voisine ou même éloignée. L'activation accidentelle d'un capteur de production peut entraîner la mise en œuvre d'une opération de transfert.

5) Les effets des erreurs humaines ou des défaillances de composants ne peuvent pas toujours être appréciés avec exactitude. La défaillance d'un composant critique peut conduire à l'opération incorrecte d'une machine.

6) L'état de la machine pendant les interventions est significatif. Il peut être nécessaire d'intervenir avec des sources d'énergie encore présentes. De plus, l'état de la machine peut être méconnu au moment de l'intervention... La machine peut être capable de mouvements en raison de l'activation d'un capteur de production, du mouvement normal d'une partie de la machine ou de mouvements résiduels (pression restante dans un cylindre).

7) Les normes existantes qui éviteraient les accidents si elles étaient bien mises en œuvre ne le sont pas ou le sont de façon incorrecte. Les concepteurs, les constructeurs et les utilisateurs auraient dû les adopter mais ne l'ont pas fait en raison de l'ignorance réelle ou simulée. Cela est vrai en particulier pour les petites et moyennes entreprises (l'enquête menée en Allemagne par l'IPA met bien en vue ce problème).

Il en découle les conséquences suivantes

• *Importance d'une procédure de travail:* il est nécessaire d'adopter une procédure de travail de sécurité adaptée au site de production. Cela n'est pas toujours possible en raison de la conception même des systèmes et machines qui impose des procédures dangereuses, par exemple lors d'interventions de maintenance. Il est parfois nécessaire d'enlever les protecteurs et de consigner le système. Il faut toujours préciser les conditions de sécurité et les procédures à suivre en toutes occasions. En fait, il faut reconnaître qu'une bonne procédure ne peut pas pallier les insuffisances dues à une mauvaise conception.

• *De l'importance d'une bonne information:* il y a souvent un manque évident d'informations fournies par les constructeurs aux utilisateurs. Il n'y a pas assez de précisions sur les opérations de maintenance et par exemple, une connaissance relative à l'action découlant de l'activation d'un composant (capteurs, par exemple). Encore plus grave, les informations sur les systèmes de sécurité sont notoirement insuffisantes.

4. DEMARCHE DE PREVENTION ADAPTEE A L'AUTOMATISATION EN GUISE DE CONCLUSION

La figure 14 illustre le réseau d'acteurs qui sont susceptibles d'intervenir lors de la mise en œuvre d'une politique de prévention. Les différentes étapes sont les suivantes:

– la réglementation,

– la normalisation,

– les documents de type guide-lines, les spécifications de sécurité, les recommandations des services de prévention...

Ces actions sont bien sûr à placer dans le cadre européen (cf. Résolution du Conseil du 7 mai 1985 concernant une nouvelle approche en matière d'harmonisation technique et de normalisation (85c/136/01)).

4.1. Considérations générales

4.1.1. «Philosophie de sécurité»

Dans le domaine de l'automatisation, les robots occupent une place spéciale et privilégiée. Généralement, ce qui est adapté à la robotique l'est également, par extension, à l'ensemble des systèmes automatisés. C'est pourquoi, les observations préliminaires contenues dans le document normatif ISO 10218 (à noter que les experts européens ont beaucoup contribué à la rédaction de ce document qui vient d'être repris en norme européenne) peuvent être considérées comme une excellente référence sur la «philosophie de sécurité» à prendre en compte afin d'assurer une prévention adaptée à cette forme de production.

Les caractéristiques de fonctionnement des robots peuvent différer de celles des autres machines et équipe-

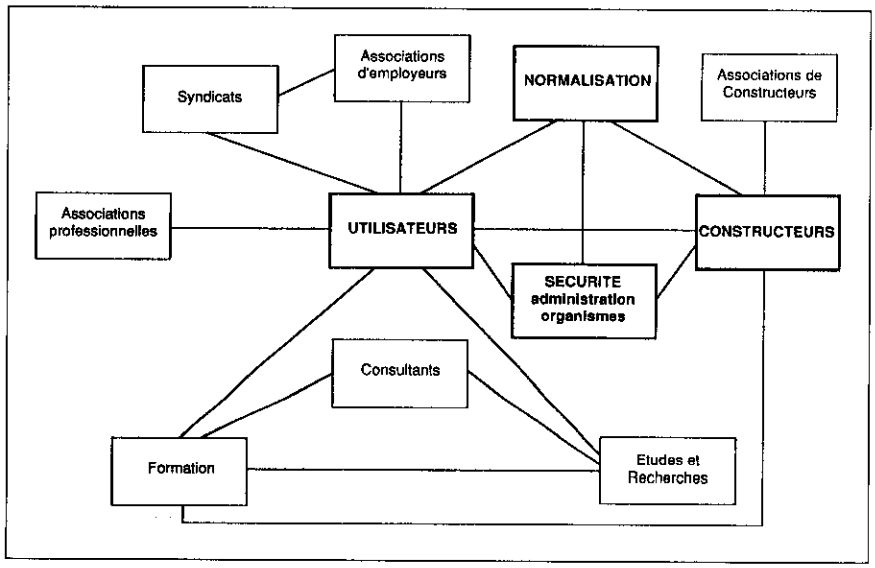

Fig. 14. Réseau d'innovation technologique

ments. Les robots peuvent avoir des mouvements à forte énergie dans un volume s'étendant bien au-delà de leur base. Le schéma des mouvements du bras et l'initialisation des mouvements sont difficiles à prévoir et peuvent varier du fait de modifications des conditions de production et d'environnement.

« Il est nécessaire, de temps en temps, que du personnel de maintenance et de programmation soit à l'intérieur de l'espace restreint alors que la puissance est disponible aux actionneurs. Il peut y avoir interférence entre l'espace restreint du robot et celui d'autres robots ou des zones de travail d'autres machines industrielles et équipements. Cela peut entraîner des risques de choc, d'écrasement et de rencontre avec des objets par le préhenseur.

« Le type de robot, son utilisation et son association avec d'autres machines industrielles et équipements influenceront la conception et le choix de méthodes de protection. Celles-ci doivent être adaptées au travail à effectuer et permettre, lorsque c'est nécessaire, la réalisation en toute sécurité de la programmation par apprentissage, de la mise au point, de la maintenance, de la vérification de programme et du dépistage de fautes. Dans beaucoup d'installations, il est nécessaire de s'approcher du robot pour réaliser de telles opérations.

« Il convient d'adapter les méthodes choisies aux risques de l'installation robotisée. Avant de concevoir ou de choisir les méthodes de protection appropriées, il est nécessaire d'identifier les sources de risques et d'évaluer les risques associés.

« Les mesures techniques de prévention des accidents sont basées sur deux principes fondamentaux:

« – l'absence de personnes dans l'espace contrôlé pendant le fonctionnement automatique;

« – l'élimination des risques ou au moins leur réduction pendant les interventions (par exemple apprentissage, vérification de programme) dans l'espace contrôlé.

« L'observation de ces principes implique plusieurs actions:

« – la création d'un espace contrôlé et d'un espace restreint;

« – une conception de la cellule robotisée permettant que le plus grand nombre de tâches soit effectué à l'extérieur de l'espace contrôlé;

« – des mesures de sécurité compensatoires dans le cas d'interventions à l'intérieur de l'espace contrôlé. »

Telle est la « philosophie de sécurité » largement acceptée dans le monde et plus particulièrement en Europe. Toutefois, des divergences existent selon les pays, mais elles ne portent pas à notre sens sur des points fondamentaux. On peut noter par exemple la valeur de la vitesse réduite en programmation, le domaine d'application du dispositif de validation, l'interverrouillage, la consignation... Bien sûr, ces divers points ne sont pas neutres en ce qui concerne la politique de prévention mais ils ne sont pas déterminants pour opposer irrémédiablement les politiques nationales de prévention.

4.2. Aspects généraux de sécurité

4.2.1. Situation présente

L'opinion que les usines robotisées sont des systèmes autonomes de production n'est pas seulement partagée par le grand public mais l'est également par nombre de planificateurs qui ainsi oublient que derrière « le rideau », il y a beaucoup d'opérateurs humains qui sont indispensables à l'accomplissement de la production automatisée mais aussi et de façon non exhaustive pour:

– préparer/transporter le matériel,

– mettre/retirer des éléments,

– créer/mettre à jour/changer les programmes,

– installer (les outils, les appareils...),

– surveiller la séquence de travail,

– assurer la maintenance / réparer l'équipement.

Dans la logique de planification décrite ci-dessus, les opérateurs humains sont regardés comme une composante « résiduelle » de l'automatisation dont on ne peut totalement se passer et qui doit être maintenue aussi faible que possible.

En fait, du point de vue de la sécurité industrielle, il serait dramatique de réduire le système de production automatique à sa simple composante technologique et de limiter le rôle de l'homme à celui d'intérimaire ou de bouche-trou (stop gap) au service de la technologie (fig. 15).

Même dans les rares cas où il est possible de trouver une solution adéquate de sécurité pour chaque catégorie de personnel, les dépenses additionnelles requises sont démesurées par rapport aux maigres résultats atteints.

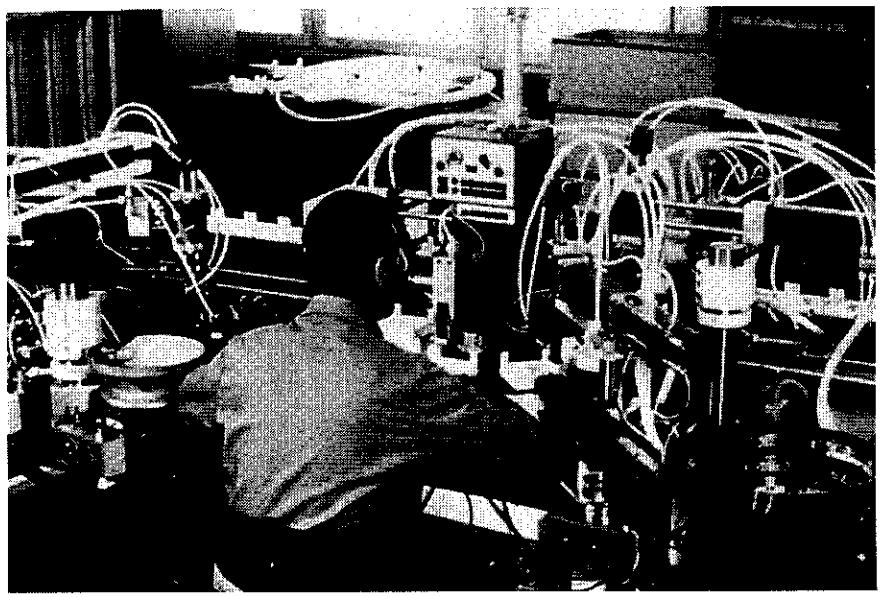

Fig. 15. Illustration de l'homme utilisé maladroitement dans un système automatique

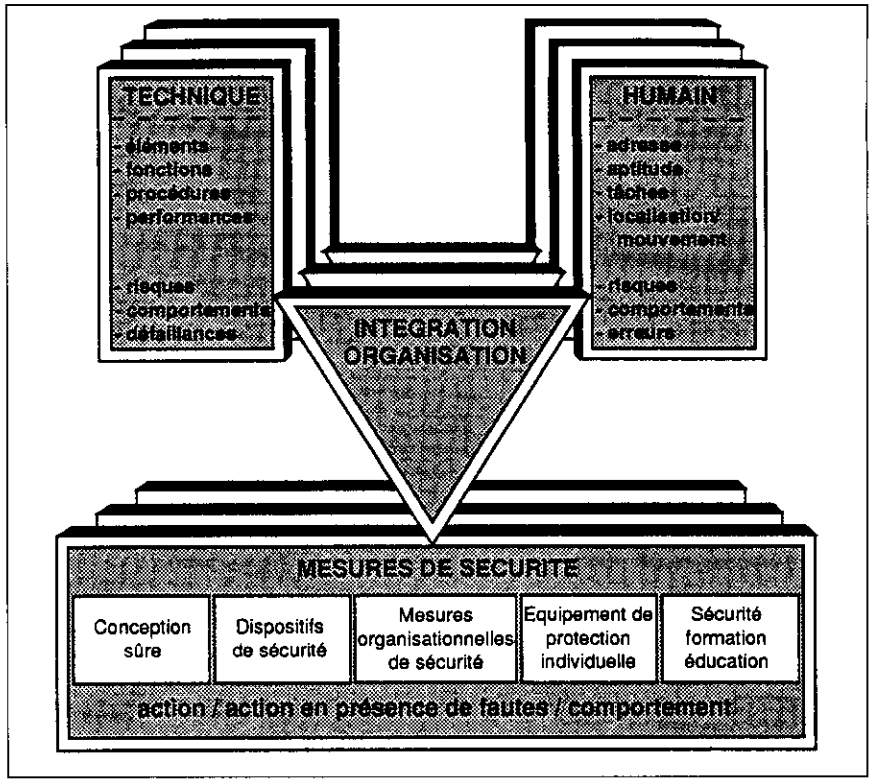

Fig. 16. Système homme-machine étendu

4.2.2. Planification orientée sécurité

Compte tenu de la situation décrite précédemment, il faut mettre en place une stratégie de planification.

Elle doit être basée sur un véritable ***système homme-machine*** (fig. 16) qui permettra de considérer les différentes activités humaines, les fonctions techniques requises et la gamme des mesures de sécurité correspondantes.

Elle doit prendre en compte qu'***un système et ses éléments*** ne sont pas statiques mais ***nécessitent un développement***. Avant que l'application ne soit réalisée, une décision préliminaire décisive a déjà dû être prise du point de vue de la sécurité (conception du robot, conception des machines et dispositifs, modes opératoires variés comme les modes automatiques semi-automatique, programmation, maintenance...) (fig. 17).

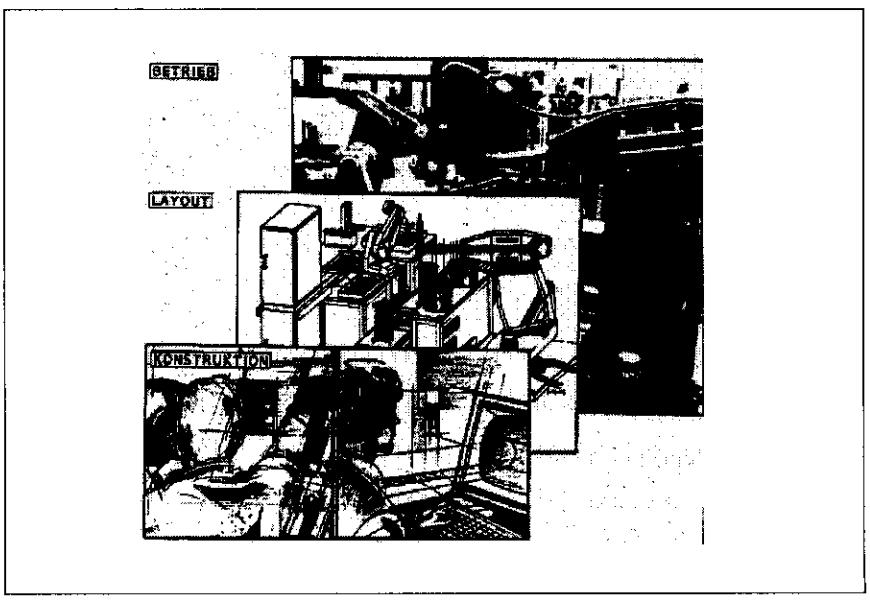

Fig. 17. Etapes du développement d'un système robotisé

Les procédures suivantes décrivent l'une : une conception système dont on a éliminé les diverses connexions afin de favoriser sa compréhension, l'autre : une sécurité industrielle.

10 étapes, du problème à la solution

- Identification du problème et analyse.
- Définition des objectifs.
- Limite de l'aire de planification.
- Analyse du poste de travail :

– préliminaire,
– détaillée.

- Gamme de solutions pour les fonctions requises.
- Evaluation de solution alternative et choix.
- Conception du système (détaillée).
- Installation et essai.
- Evaluation (objectifs, résultats).
- Amélioration/révision.

9 étapes pour une sécurité industrielle

- Différents problèmes de sécurité industrielle (analyse de risques).
- Objectifs de sécurité industrielle prenant en compte les aspects réglementaires.
- Aire de problème (aire de risque) $\leq$ aire de planification choisie.
- Gamme d'activités/dangers potentiels pour diverses catégories de personnel.
- Gamme de solutions :

– conception,
– dispositifs de sécurité,
– mesures de sécurité organisationnelle,
– dispositifs de sécurité individuelle,
– formation.

- Evaluation/choix en accord avec les critères de sécurité industrielle prenant en compte les paramètres techniques, organisationnels et économiques.
- Intégration des mesures de sécurité dans les solutions générales.
- Evaluation des mesures de sécurité.
- Amélioration/révision.

Tandis que de nombreux systèmes d'aide sont disponibles pour les aspects technico-économique de la conception des robots industriels (questionnaires pour l'analyse de poste de travail, banques de données et catalogues pour divers composants, programmes pour CAO, collections de solutions éprouvées, programmes pour calculs de rentabilité...), il existe une énorme demande non satisfaite concernant « l'aspect humain » en général.

Les aides requises pour la planification des mesures de sécurité industrielle peuvent être distribuées entre les 2 domaines suivants :

– définition du problème et objectifs (c'est-à-dire analyse de risque, tâches dangereuses, personnes exposées, objectifs de sécurité) ;
– solution du problème et réalisation (c'est-à-dire gamme de solutions, sélection, intégration et installation).

4.2.3. Gamme des mesures de sécurité

Dans les publications sur la sécurité industrielle et aussi dans les normes et les guides de bonne pratique, il est usuel de distinguer les différentes mesures de sécurité par rapport à différents points de vue comme le principe sous-jacent ou l'objet de la mesure prise tout en réalisant une différenciation en termes de qualité.

Nous suivons ici une classification par objet des mesures de sécurité (fig. 18).

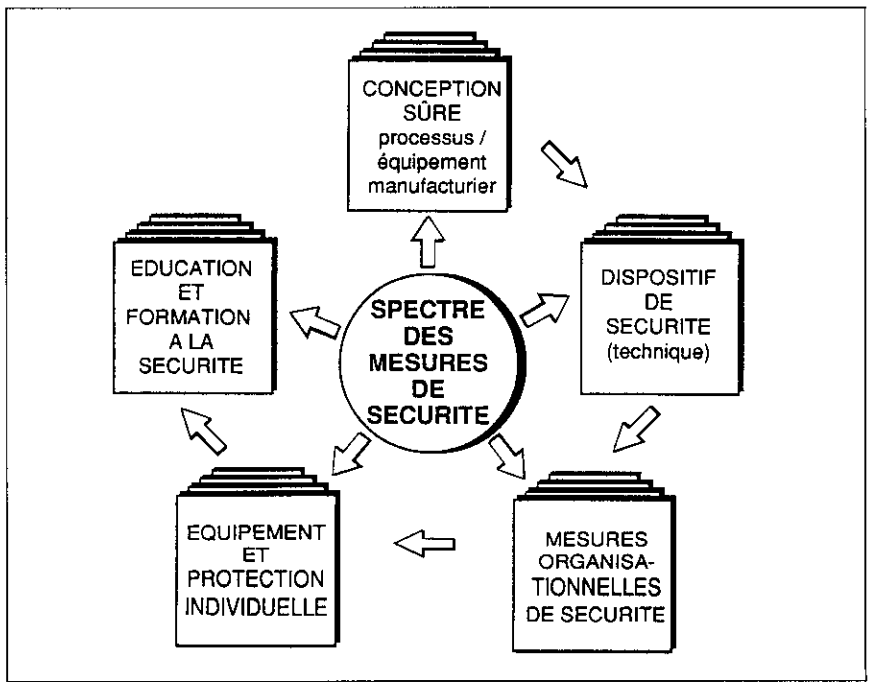
CONCEPTION SÛRE processus / équipement manufacturier
EDUCATION ET FORMATION A LA SECURITE
SPECTRE DES MESURES DE SECURITE
DISPOSITIF DE SECURITE (technique)
EQUIPEMENT ET PROTECTION INDIVIDUELLE
MESURES ORGANISA-TIONNELLES DE SECURITE

Fig. 18. Spectre des mesures de sécurité

Conception sûre

La conception sûre est très complexe à aborder mais il est possible d'établir un petit nombre de catégories de mesures parmi les plus importantes (voir tableau XI) avec quelques exemples. La conception sûre doit être associée à trois aspects:

– la catégorie des mesures de sécurité choisies (par exemple la réduction du risque) de laquelle composants et sous-systèmes sont à tirer;

– les exigences (minimales et souhaitées) de la sécurité industrielle planifiée;

– les possibilités de mener à bonnes fins une ou plusieurs solutions.

Dispositifs de sécurité

On englobe sous ce terme tous les éléments de sécurité qui offrent une protection active et ne peuvent pas être mis en œuvre par une action délibérée de l'homme. Ils sont fondés principalement sur la séparation entre l'homme et la zone dangereuse soit:

– par une protection matérielle (protecteurs, murs... interdisant toute approche);

– par une détection de l'approche et/ou du contact par des barrages immatériels, des planchers sensibles, des détecteurs d'intrusion coupant les mouvements dangereux.

En fait, tous ces exemples de protecteurs consistent à interdire ou à protéger l'ensemble de la zone robotisée. Il est possible également d'envisager une protection de type anticollision consistant à revêtir les axes de robot d'un dispositif détectant l'approche ou la collision avec le personnel entraînant de ce fait l'arrêt des mouvements.

TABLEAU XI

Mesures pour une conception plus sûre

Catégories de mesures	Exemples en robotique
Réduction des risques (degrés de risque, aire d'effet).	– Vitesse réduite en programmation – Espace réglable des limites de mouvements – Clôtures – pas de pièces projetées – Freins efficaces
Protecteurs/couverture de l'aire de danger/source.	– Chaînes – Mise en sécurité des conducteurs
Transition en état de sécurité suite à l'apparition de défaillances (méthodes de sécurité positive).	– Surveillance des câbles (courts-circuits) – Protection contre les collisions (limiteur de puissance moteur) – Diverses mesures pour la commande – Protection contre les redémarrages – Maintien du freinage
Possibilité d'intervention (en manuel) afin d'amener le système rapidement sous contrôle.	– Commutation d'arrêt d'urgence – Commutation marche – Commutation validation
Réduction des défaillances de composants et des défauts de fonctions.	– Composants de secours – Protection de surcharge – Surdimentionnement – Redondance (active, passive) – Protection contre les dommages – Influences de l'environnement – Surveillance de marche et maintenance préventive
Réduction du risque dû à des erreurs humaines. Tolérance aux fautes.	– Conception ergonomique (boîtier de programmation armoire de commande) – Aide au diagnostic – Protection contre les surcharges – Protection contre les démarrages intempestifs
Avertissements rapides d'états dangereux du système.	– Procédure rapide de remise en marche après un arrêt d'urgence – Visualisation d'état de marche – Visualisation de défaut – Avertissement avant la mise en mouvement du robot.

Mesures organisationnelles de sécurité

En ce qui concerne l'industrie traditionnelle, cet aspect est souvent négligé en faveur des mesures techniques. Cependant en production automatisée, les mesures organisationnelles de sécurité deviennent essentielles au même titre que les mesures techniques. En raison d'une part de la complexité croissante des systèmes et d'autre part de l'augmentation des activités telles que la programmation, la maintenance, le dépistage de fautes, il devient plus difficile de mettre en place des solutions techniques idéales, ou de les prévoir sans des mesures d'accompagnement:

– organiser les activités manuelles requises qui peuvent être exécutées hors de la zone dangereuse ou lorsque le danger a été supprimé;

– décider de la responsabilité pour chacune des tâches requises du point de vue de la sécurité;

– établir les plans de travail pour la maintenance, les essais, le dépistage de fautes et la réparation;

– préparer les outils, les dispositifs, les pièces de rechange;

– concevoir les conditions de travail afin d'éviter les surcharges (faible visibilité, espace restreint);

– visualiser l'apparition de dangers et s'assurer que le travail peut être exécuté tout de même de façon sûre.

Equipement de protection individuelle

L'équipement de protection individuelle typique (casques, chaussures, vêtements) est d'une utilité fort limitée en robotique, à l'exception de certaines situations spécifiques à l'application:

– lunettes de protection pour lasers et soudage,

– masques respiratoires pour peinture.

Notons également qu'un constructeur propose un vêtement sensible à la pression qui coupe la puissance robot lors d'une collision.

Ce produit peut être utile pour les programmeurs, mais la présence d'un câble indispensable pour la liaison et le fait que l'arrêt soit lié à une collision pose des problèmes d'efficacité et d'acceptation par le personnel.

Formation à la sécurité/enseignement

Il est essentiel d'informer le personnel, pour lequel les mesures de sécurité ont été mises en œuvre, sur les points suivants:

– comment est-il possible de travailler de façon sûre et/ou quels risques existent?

– quelles précautions de sécurité ont été prise?

– comment les mettre en œuvre?

– quelle maintenance et quelle procédure de réparation nécessitent-elles?

C'est au constructeur du robot de répondre à ces questions (instructions opératoires, cours pour programmeurs et personnel de maintenance...).

Toutefois, l'utilisateur doit, de son côté, prévoir une formation adaptée à son personnel (formation au sujet des dispositifs de sécurité, de la simulation de défauts, travail sûr, redémarrage après collision), qui vont bien au-delà des instructions usuelles et des explications sur la sécurité communément comprise.

ANNEXE 1

Projets de robotique avancée pilotés par le Royaume-Uni

Aide à la mobilité des patients (PAM)

Un robot mobile pouvant soulever et déplacer les patients est en cours de développement. Il peut être commandé sous contrôle de l'opérateur (une infirmière ou un aide) mais, à terme, il pourrait être contrôlé par le patient. La structure générale comporte une série de barres horizontales reconfigurables qui, lorsqu'elles sont alignées, forment une surface plane qui peut être glissée sous le patient, lequel peut être soulevé de son lit; le cas échéant, les barres peuvent être reconfigurées pour amener le patient en position assise. Les fonctions de contrôle du système, notamment le dispositif anticollision, la gestion de la sécurité, le contrôle de la traction, la prise du patient, la navigation et l'interface avec l'opérateur doivent être exécutées par un ordinateur et un système de supervision réalisés sur demande.

Rééducation

Nombre de développements actuels visent à améliorer la qualité de vie de gens souffrant de handicaps moteurs, mais ils ne rentrent pas dans la catégorie des équipements de travail. Toutefois, certains robots de rééducation sont spécifiquement conçus comme des postes de travail pour permettre à l'opérateur d'évoluer dans un environnement de travail et pourraient, à ce titre, entrer dans le domaine « équipements de travail ». Ces robots de rééducation en cours de développement seront confrontés au problème de l'interaction homme-machine, tels que la fiabilité du système de commande, la qualité des logiciels, ainsi que les systèmes de supervision et de contrôle.

Au nombre des projets intéressants:

– contrôle d'un manipulateur via une articulation d'épaule;

– contrôle d'un robot via les mouvements de la tête: robotique interactive pour assistance des personnes qui n'ont plus entièrement l'usage de leurs mains dans leur travail au sein de l'industrie manufacturière; robot personnel pour un mode de vie indépendant; unité de soins commandée par micro-ordinateur pour le foyer ou l'hôpital; poste de travail robotisé pour le bureau, destiné à manipuler des dossiers ou des livres lourds; contrôleur actionné par la langue pour manipulateur monté sur chaise roulante; robot d'alimentation pour des personnes en foyer souffrant d'un handicap moteur extrême; unité mobile robotisée de rééducation.

Assistance en chirurgie

Une étude a révélé que la voie la plus prometteuse résidait dans des interventions combinant des techniques aussi peu invasives que possible, une haute précision et la technologie des systèmes d'imagerie médicale. La plupart d'entre elles concernent la tête, mais cela ne veut pas dire que le robot d'assistance chirurgicale (SARAH) doive remplacer le chirurgien: SARAH constitue en fait un outil de haute technologie permettant à l'intervenant humain d'atteindre de meilleurs résultats en un temps plus court. Il utilise cinq modules: le contrôleur intelligent de haut niveau, les sondes et les modules de modélisation et simulation, le manipulateur, les unités terminales de l'outil, l'interface homme-ordinateur.

La prostatectomie par robot a été sélectionnée pour le projet de robotique avancée. Cette opération, banale, requiert cependant beaucoup de pratique et présente des difficultés d'exécution. Elle pourrait gagner en précision et en rapidité si elle était automatisée.

Lutte contre l'incendie – Sécurité (SAFFAR)

Ce robot est actuellement développé par un groupe d'universitaires, d'instituts de recherche et de sociétés industrielles du Royaume-Uni travaillant en collaboration dans le cadre du « programme international pour la robotique avancée ». L'objectif est de reproduire, à coût réduit, un robot mobile à hautes performances capable d'identifier l'incendie ou les intrus et d'éteindre de petits feux au moyen d'un extincteur portable. Il sera mû par batteries et monté sur des roues vénitiennes pour lui permettre de gravir des marches et franchir des escaliers; en outre, il sera complètement autonome. Son ordinateur de bord contient une carte de son environnement, modifiable et mise à jour. Les éléments non répertoriés, par exemple, un paquet tombé sur le sol, un intrus, peuvent être détectés et identifiés à l'aide d'un ensemble de détecteurs. Si une anomalie est enregistrée (incendie, intrus), le centre de commande du robot est alerté. Normalement, le robot fonctionnera au moyen de son propre ordinateur de bord, mais il sera possible de le faire diriger directement par l'équipe du centre de contrôle des robots.

ARRL travaille sur un projet de développement de sous-systèmes destinés à améliorer les capacités de navigation de ce robot dans un environnement encombré (bureau, usine). Ils ont ajouté un système informatisé multiprocesseur à hautes performances et des détecteurs supplémentaires.

ANNEXE 1 (suite)

Intervention en milieu hostile

Beaucoup de recherches sont menées dans le monde sur le thème de l'automatisation de réparation dans l'optique d'intervention en milieu hostile à l'homme avec nécessité d'une grande précision dans la manipulation pour raison de sécurité (nucléaire, chimie...).

Robotique mobile

Il s'agit d'études poussées particulièrement sur le plan de la mécanique permettant à des robots mobiles de se déplacer sur des terrains extrêmement difficiles tout en maintenant horizontale la table de travail.

Télé-existence

Il s'agit de recherches sur les systèmes maître-esclave et la visionique, permettant d'associer homme et robot pour l'exécution à distance d'une opération précise (entretien de vannes par exemple). A l'aide d'un système de vision, l'homme agit à distance sur une opération en milieu hostile à l'aide d'un robot maître qui transmet par télécommande à un robot esclave les ordres de l'opérateur. Cette association permet une grande précision dans la commande ainsi qu'une grande flexibilité.

Association de robots

Cette recherche associe plusieurs robots travaillant en symbiose pour une plus grande précision dans l'exécution par exemple, trois robots peuvent être associés dont deux robots manipulateurs et un robot de vision.

Pour les opérations minutieuses et délicates, en nucléaire par exemple, le robot de vision recherche la meilleure position possible afin de fournir aux autres des informations très précises permettant d'affiner l'opération en cours.

Robotique agricole

Des recherches importantes sont en cours dans le monde. Une vingtaine de projets d'envergure sont en cours de développement. Des prototypes sont actuellement expérimentés :

– robots cueilleurs (d'asperges, de fleurs de safran...),

– robots animaliers (traite automatique des vaches, tonte des moutons...),

– robots forestiers (abattage d'arbres, transport de grumes...).

■

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ
30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14
Tiré à part des Cahiers de notes documentaires, 4e trimestre 1992, n° 149 – ND 1895 – N° CPPAP 804 AD/PC/DC du 14-03-85
Directeur de la publication : D. MOYEN
ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0249-9